

# Analyse dynamischer Sichtsituationen zur ergonomischen Auslegung von Kamera-Monitor- Systemen (KMS) in schweren Nutzfahrzeugen

Vom Fachbereich Maschinenbau  
der Technischen Universität Darmstadt

zur  
Erlangung des akademischen Grades  
eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

## DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Alexander Georg Bothe

aus Vaihingen an der Enz

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. phil. Klaus Bengler
Tag der Einreichung:	30.06.2014
Tag der mündlichen Prüfung:	14.10.2014

Darmstadt 2015

D17

---

---

## **Erklärung**

---

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbständig verfasst habe.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und noch nicht veröffentlicht.

Stuttgart, den 30. Juni 2014

Alexander Georg Bothe

---



---

*"Millions of items of the outward order are present to my senses which never properly enter into my experience. Why? Because they have no interest for me. My experience is what I agree to attend to... Everyone knows what attention is. It is the taking possession by the mind, in clear and vivid form, of one out of what seem several simultaneously possible objects or trains of thought. Focalization, concentration, of consciousness are of its essence. It implies withdrawal from some things in order to deal effectively with others"*

William James (1890 S. 402 ff.)

---

---

## Vorwort

---

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Entwicklungsingenieur und Doktorand in der Abteilung für Systemapplikation der Lkw-Vorentwicklung der Daimler AG. Für die Möglichkeit zur Durchführung der Probandenversuche und Anfertigung der Dissertation möchte ich den beteiligten Abteilungsleitern Herrn Dr.-Ing. Andreas Schwarzhaupt und Herrn Dipl.-Ing. Markus Kirschbaum herzlich danken.

Meinem Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. Ralph Bruder, Leiter des Instituts für Arbeitswissenschaft (IAD) und Vizepräsident der Technischen Universität Darmstadt, danke ich herzlichst für die wissenschaftliche Betreuung und umfangreiche Unterstützung während der einzelnen Phasen meines Promotionsvorhabens. Trotz der angespannten Terminsituation nahm er sich die notwendige Zeit zur Diskussion und Abstimmung. Insbesondere möchte ich das Verständnis der Priorisierung innerhalb einer Industriepromotion und die Möglichkeit zur anwendungsorientierten Interpretation der Forschungsfragen hervorheben.

Bei Herrn Professor Dr. phil. Klaus Bengler, Leiter des Lehrstuhls für Ergonomie (LfE) der Technischen Universität München, bedanke ich mich für die freundliche Übernahme des Ko-Referats und die erfolgreichen Diskussionen. Die Erfahrungen aus seinen umfangreichen Forschungs- und Gremienarbeiten zum Thema der sichtpriorisierten ergonomischen Fahrzeugauslegung waren ein Gewinn für die Analyse dynamischer Sichtsituationen.

Meinen besonderen Dank spreche ich meinen Kollegen im Team für Energiemanagement der Lkw-Vorentwicklung aus. Enrico Wohlfarth ermöglichte mir die selbstständige Durchführung des Promotionsvorhabens und die parallele Anwendung der Erkenntnisse innerhalb der Entwicklungsprojekte. Durch diese Einbindung in den Fahrzeugentwicklungsprozess konnten die umfangreichen und kostenintensiven Probandenversuche durchgeführt und die Analyseergebnisse zur ergonomischen Auslegung genutzt werden. Bei Alisa Boller, Konrad Deuschle und Ralf Oberfell fand ich immer ein offenes Ohr und ausgezeichnete fachliche Unterstützung. Ich danke Werner Kober, Sebastian Reikowski, Hans-Christian Jochim und Norman Krippner für die wertvollen Diskussionen und die unermüdliche Hilfe beim Aufbau und der Betreuung der Versuchsfahrzeuge.

Den Kollegen der Pkw-Forschung und Ergonomieabsicherung; Andreas Proettel, Lars Salzbrenner, Gabor Schmidt und Uwe Scholly, danke ich für die Bereitstellung von Messtechnikkomponenten, die hervorragende Unterstützung bei der Konzeption und Durchführung der Probandenversuche, sowie die fachliche Abstimmung in Bezug auf die ergonomischen Sichtthemen. Ich danke den weiteren Versuchsleitern und Versuchsexperten Alexandra Stross, Sebastian Pönicke, Bettina Atz und Magdalena Schuler für ihre wertvolle und ausdauernde Unterstützung.

Meinen Studenten Davide Gatti, Jennifer Hebe, Kathrin Isella und Benedikt Kläser, die ich innerhalb ihrer Praktikantenzeit und während der Anfertigung der Abschlussarbeit betreuen durfte, danke ich für die hervorragende Arbeit, den vorbildlichen Einsatz und die spannenden Diskussionen. Ich danke allen Lkw-Fahrern, die an den Probandenversuchen teilgenommen haben. Sie haben ihr erlerntes dynamisches Sichtverhalten in die ergonomische Forschung eingebracht und ermöglichen damit eine Weiterentwicklung ihres Arbeitsplatzes und die Auslegung von neuartigen Sichtsystemen.

Ich bedanke mich bei Bettina Abendroth, Gruppenleiterin für Fahrzeuergonomie, sowie allen Doktorandenkolleginnen und -kollegen des IADs für die freundliche Aufnahme am Institut, die fruchtbaren Diskussionen und den damit verbundene fachlichen und persönlichen Input. Diese Unterstützung ermöglichte eine praxisorientierte wissenschaftliche Arbeit in der vorliegenden Form. Ich danke allen nicht persönlich genannten Kollegen und Konferenzteilnehmern, die mein Promotionsvorhaben durch ihre kritischen Diskussionen unterstützt und vorangetrieben haben.

Besonders möchte ich mich bei meiner gesamten Familie bedanken. Sie war und ist ein Rückhalt in jeder Lebenslage, hat mir die Freiheit zur selbstbestimmten Entwicklung gegeben und unterstützt mich in all meinen Entscheidungen. Jedes Familienmitglied ist einzigartig und hat mich auf ihre/seine ganz persönliche Weise geprägt. Ich bedanke mich bei meinen Freunden, die insbesondere in der letzten Promotionsphase des Öfteren auf mich verzichten mussten, mich jedoch verständnisvoll und selbstlos unterstützt haben.

---

## Inhaltsverzeichnis

---

Vorwort.....	I
Glossar.....	V
Abkürzungsverzeichnis .....	VII
Abstract.....	IX
1 Einleitung .....	1
1.1 Motivation.....	1
1.1.1 Transportaufgabe des Nutzfahrzeugs .....	2
1.1.2 CO <sub>2</sub> -Reduktionsziele als Wegbereiter für neue Technologien.....	3
1.1.3 Etablierung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) .....	6
1.1.4 Dynamische Nutzung konventioneller Spiegelsysteme .....	8
1.2 Zielsetzung und Struktur der Arbeit .....	10
1.3 Eingrenzung des Untersuchungsinhalts .....	11
2 Stand der Technik und Forschung .....	13
2.1 Ergonomische Aspekte der Sicht aus dem Fahrzeug.....	13
2.1.1 Informationsaufnahme und -verarbeitung .....	13
2.1.2 Eigenschaften des menschlichen Auges.....	14
2.1.3 Sichtaufgabe und Sichteinschränkung im Nutzfahrzeug.....	17
2.2 Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS).....	20
2.2.1 Ergonomischer Absicherungsprozess.....	21
2.2.2 Ableitung der technologiebedingten Auslegungsparameter eines KMS .....	24
2.2.3 Festlegung der konzeptionellen Auslegungsparameter eines KMS .....	25
2.2.4 Sichtwinkelabhängige Darstellungsqualität des Monitors .....	27
2.2.5 Situationsabhängige Anpassung des dargestellten Sichtbereichs .....	28
2.3 Sichtdatenerhebung zur ergonomischen Fahrzeugauslegung .....	30
2.3.1 Messung statischer Augpunktlagen .....	30
2.3.2 Messung dynamischer Sichtdaten .....	35
2.3.3 Bestimmung von Sichtbereichen der indirekten Sicht.....	38
2.4 Ableitung der Forschungsbedarfe.....	41
2.4.1 Statische und dynamische Augpunktlagenverteilungen.....	42
2.4.2 Fahrzustandsparameter zur Beschreibung des dyn. Sichtverhaltens.....	44
2.4.3 Dynamische Sichtbereiche der indirekten Sicht.....	45
3 Probandenversuch zur Erhebung der Rohdaten .....	46
3.1 Unabhängige Variablen.....	46
3.1.1 Faktor A: Körperhöhe .....	46
3.1.2 Faktor B: Taillenumfang .....	47
3.1.3 Faktor C: Fahrzeugvariante.....	49
3.1.4 Faktor D: Sichtsituation .....	51
3.2 Abhängige Variablen.....	54
3.2.1 Fahrerbezogene statische Messwerte .....	54
3.2.2 Fahrzeugbezogene statische Messwerte.....	55
3.2.3 Fahrerbezogene dynamische Messwerte .....	55
3.2.4 Fahrzeugbezogene dynamische Messwerte.....	57

3.2.5	Systembewertende subjektive Messwerte .....	58
3.3	Versuchsdesign.....	59
3.3.1	Konzeption der empirischen Betrachtung .....	59
3.3.2	Versuchsumgebung.....	60
3.3.3	Ablaufplan.....	61
3.3.4	Versuchsstrecke .....	63
3.3.5	Probandenakquise.....	65
3.3.6	Stichprobenbeschreibung.....	66
3.4	Messtechnik .....	69
3.4.1	Messtechnikauswahl .....	69
3.4.2	Messtechnikintegration im Versuchsfahrzeug .....	72
3.4.3	Datenaufzeichnungsarchitektur.....	74
3.5	Messvorbereitung und Datenerhebung.....	75
3.5.1	Probandenindividuelle Messsystemkalibrierung .....	75
3.5.2	Situationsabhängige Datenaufzeichnung.....	77
4	Datenanalyse und ergonomische Auslegung .....	78
4.1	Datenaufbereitung.....	78
4.1.1	Aufzeichnungsanteile und Sichtdatenverfügbarkeit .....	78
4.1.2	Aufbereitung der fahrerbezogenen dynamischen Messwerte.....	80
4.1.3	Aufbereitung der fahrzeugbezogenen dynamischen Messwerte .....	81
4.1.4	Ergonomische Sichtdatenbank.....	82
4.1.5	Modell zur Sichtbereichsberechnung .....	83
4.2	Analyse statischer und dynamischer Augpunktlagenverteilungen .....	85
4.2.1	Vergleich statischer und dynamischer Augpunktlagen .....	85
4.2.2	Einfluss der Körperhöhe (Faktor A).....	90
4.2.3	Einfluss des Taillenumfangs (Faktor B).....	92
4.2.4	Einfluss der Fahrzeugvariante (Faktor C) .....	93
4.2.5	Einfluss der Sichtsituation (Faktor D) .....	95
4.3	Identifikation des Knickwinkels als Prädiktor dynamischen Sichtverhaltens .....	105
4.3.1	Zusammenhang zwischen der Sichtsituation und dem Knickwinkel.....	105
4.3.2	Zusammenhang zwischen der Sichtsituation und der Geschwindigkeit .....	107
4.3.3	Zusammenhang zwischen dem Knickwinkel und der Geschwindigkeit .....	109
4.3.4	Geschwindigkeitsabhängigkeit der dynamischen Augpunktlagen .....	110
4.3.5	Knickwinkelabhängigkeit der dynamischen Augpunktlagen.....	112
4.4	Analyse dynamischer Sichtbereiche der indirekten Sicht.....	115
4.4.1	Subjektive Bewertung der verfügbaren Sichtbereiche .....	115
4.4.2	Einfluss der Sichtsituation (Faktor D) .....	116
4.4.3	Einfluss der Fahrzeugvariante (Faktor C) .....	119
4.4.4	Einfluss der Körperhöhe (Faktor A).....	121
4.5	Ergonomische Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS).....	122
4.5.1	Monitorausrichtung auf die dynamischen Augpunktlagen.....	122
4.5.2	Verschiebekennlinie des Kamera-Monitor-Systems (KMS) .....	123
5	Diskussion der Ergebnisse.....	126
5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	126
5.2	Kritische Reflexion der Untersuchungsschritte .....	130
5.2.1	Versuchskonzeption und Datenaufzeichnung .....	130

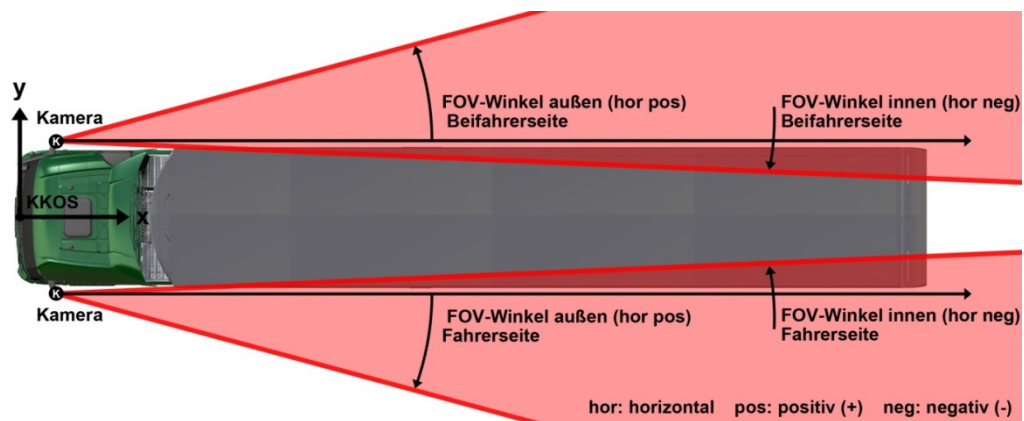
---

5.2.2	Datenaufbereitung und -analyse .....	131
5.3	Übertragbarkeit der Erkenntnisse in eine Methode .....	132
5.3.1	Durchführungsschritte und systematische Anwendung .....	132
5.3.2	Einbindung in den ergonomischen Auslegungs- und Absicherungsprozess .....	133
6	Schlussfolgerung und Ausblick .....	134
6.1	Schlussfolgerung für die Wissenschaft .....	134
6.2	Schlussfolgerung für die Praxis .....	137
6.3	Ausblick für weitere Arbeiten .....	138
7	Zusammenfassung .....	140
Anhang	.....	X
Abbildungsverzeichnis	.....	XLVIII
Tabellenverzeichnis	.....	LIV
Literaturverzeichnis	.....	LVI

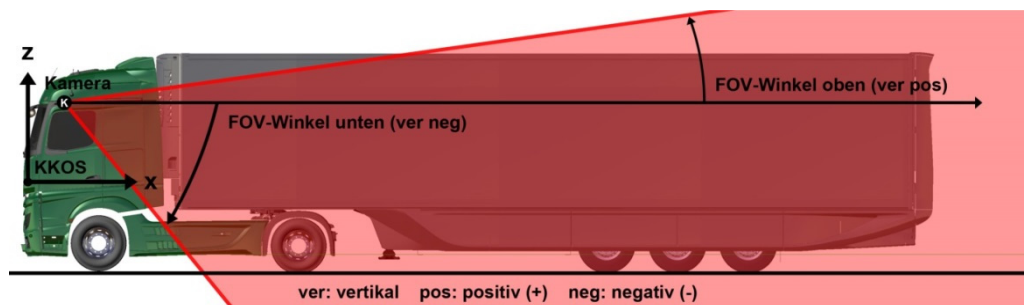
## Glossar

Augpunkt	Mittelpunkt des Augapfels (Bulbus oculi) des linken bzw. rechten Auges
Augpunktlage	Position des Augpunkts im dreidimensionalen Raum (x-, y-, z-Koordinaten im KKOS)
Aufsetzhöhe	Abstand zwischen Fahrzeugrahmen und Fahrerhausboden; beeinflusst die Anbringungshöhe der Nutzfahrzeugkabine über der Fahrbahnebene
Baseline-Sichtsituation	Fahrsituation mit niedriger Komplexität der Sichtaufgabe (fahrstreckenabhängig)
Blind Spot	aus der Augpunktlage aufgrund von Sichtverdeckungen nicht direkt einsehbarer Bereich der Fahrzeugumgebung
direkte Sicht	Sicht im oder aus dem Fahrzeug ohne optische Hilfsmittel, wie Spiegel oder el. Sichtsysteme
Fahraufgabe	„Die Fahraufgabe besteht primär aus der von einem Menschen geregelten Fortbewegung mit Hilfe eines landgebundenen Kraftfahrzeuges von A nach B, unter der Berücksichtigung, dass keine anderen Gegenstände, außer der Fahrbahn berührt werden [...] Zusätzliche, individuelle Aspekte der Fahraufgabe liegen z.B. darin, dass der Fahrer möglichst wirtschaftlich, sportlich, komfortabel etc. unterwegs sein will.“ (Schweigert 2002 S. 18)
Fixation	Ausrichtung des Auges auf ein Sichtobjekt zur gezielten Informationsaufnahme
Fixationsachse	Strahlengang vom Augpunkt zum Sichtziel während einer Fixation; $\triangleq$ Sichtstrahl
fovealer Sichtbereich	Sichtbereich innerhalb dessen Informationen mit hoher Sehschärfe und Farbwahrnehmung gezielt aufgenommen werden können
Gaze-Tracking	Aufzeichnung der Augpunktlage und Sichtstrahlorientierung
Gliederzugkombination	Nutzfahrzeugkombination bestehend aus dreiachsigem Fahrzeug und zweiachsigem Anhänger
Head-Tracking	Aufzeichnung der Kopfposition und -ausrichtung
ideale Fahrhaltung	idealisierte Sitzhaltung auf dem Fahrerplatz eines Fahrzeugs; dabei sind die Füße auf den Pedalen, die Hände auf dem im Verstellfeld positionierten Lenkrad und der Torso auf dem Sitz platziert; der Sichtstrahl ist nach vorne auf die Fahrbahn gerichtet
indirekte Sicht	Sicht aus dem Fahrzeug über optische Hilfsmittel, wie Spiegel oder el. Sichtsysteme
Just-in-Time-Anlieferung	bedarfssynchrone Anlieferung von Gütern zur Reduktion der Lagerhaltung
Kamera-Monitor-System	elektronisches Sichtsystem zum Ersatz der Spiegelsysteme zur Darstellung der Sichtfelder der indirekten Sicht (Klasse II und IV; vgl. ECE-R 46/02 2009 Abs. 15.2.4)
Konzepterprober	fahrtüchtiges prototypisches Fahrzeug zur Erprobung von neuen Fahrzeugkonzepten
Körperhöhe	Körpermaß des Menschen; Definition: Vertikale Distanz von der Standfläche bis zum höchsten Punkt des Kopfes (Vertex). (Jürgens 1999 B-1.2.1)
Mittelaugpunkt	Konstruktionspunkt in der Mitte zwischen linkem und rechtem Augpunkt; die Mittelaugpunkte (ORP & GAUM) werden in der Fahrzeugauslegung herangezogen
Nutzfahrzeug	Kraftfahrzeug das auf den Transport von Gütern ausgelegt ist
Packaging	konzeptionelle Darstellung zur Absicherung der Volumen und Wechselwirkungen von Fahrzeugkomponenten
peripherer Sichtbereich	Sichtbereich innerhalb dessen Informationen mit reduzierter Sehschärfe und Farbwahrnehmung aufgenommen werden können (vgl. fovealer Sichtbereich)
Rendering	computerbasierte Berechnung einer photorealistischen Darstellung auf Grundlage der optischen Strahlengänge
Sattelzugkombination	Nutzfahrzeugkombination bestehend aus zweiachsiger Zugmaschine und dreiachsigem Sattelaufleger
Sichtfeld	regulativ vorgeschriebener Sichtbereich (vgl. ECE-R 46/02 2009 Abs. 15.2.4)
Sichtkegel	Volumen sichtbarer Objekte; aufgespannt durch die Augpunktlage und den einsehbaren Sichtbereich
Sichtstrahl	Strahlengang vom Augpunkt zum Sichtziel während einer Fixation; $\triangleq$ Fixationsachse
spezielle Fahrsituation	Fahrsituation gekennzeichnet durch niedrige Geschwindigkeit und hohen Knickwinkel (vgl. ISO/FDIS 16505 2014 S. 125) innerhalb derer die statischen Sichtfelder (vgl. ECE-R 46/02 2009 Abs. 15.2.4) nicht erfüllt werden müssen

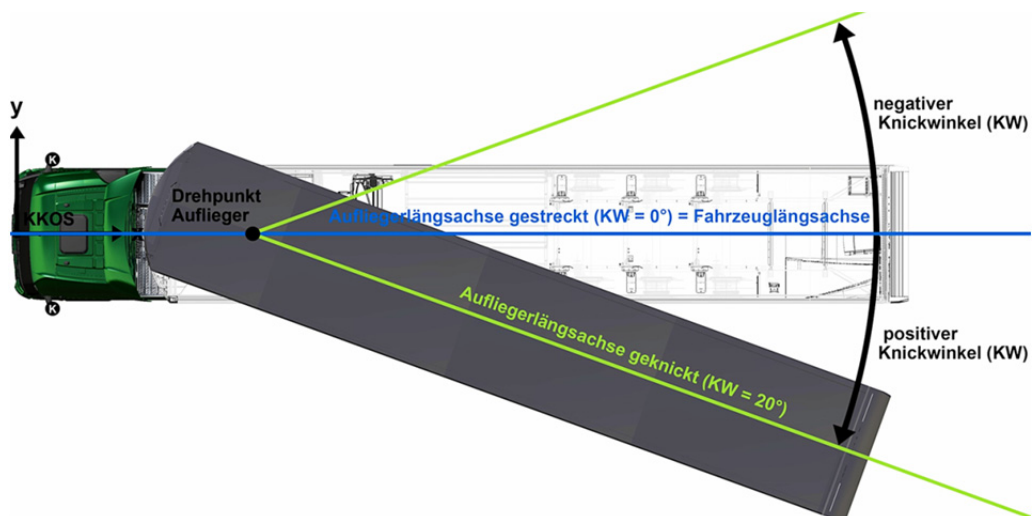
Stammlänge	Körpermaß des Menschen; Definition: Vertikale Distanz von der Sitzfläche bis zum höchsten Punkt des Kopfes (Vertex). (Jürgens 1999 B-1.2.31)
Stereophotogrammetrie	optisches Verfahren zur Messung von Augpunktlagen; basierend auf zwei Messbildern; aus kalibrierten Kameras wird die Position des Augpunktes berechnet
Taillenumfang	Körpermaß des Menschen; Definition: Kleinster horizontaler Umfang des Abdomen in Höhe der am meisten eingezogenen Punkte der Seitenkontur des Körpers zwischen Rippenbogen und Darmbeinkamm. (Jürgens 1999 B-1.2.80)
Tonnenkilometer	Maß für die Transportleistung von Gütern; transportierte Masse [t] je Wegstrecke [km]
Total Cost of Ownership	Gesamtkosten bestehend aus Anschaffungs- und Betriebskosten eines Nutzfahrzeugs
Transportaufgabe	Anforderung des Transports von Waren von A nach B



Definition des Kabinen-Koordinatensystems (KKOS) und der Sichtbereichswinkel (FOV-Winkel) Draufsicht



Definition des Kabinen-Koordinatensystems (KKOS) und der Sichtbereichswinkel (FOV-Winkel) Seitenansicht



Definition des Knickwinkels (KW) zwischen Zugmaschine und Auflieger einer Sattelzugkombination



## Abkürzungsverzeichnis

A	Lebensalter
AB	Autobahnanteil der Fahrstreckenzusammensetzung
AOI	Sichtzielfläche (v. engl. Area Of Interest)
BAK	Bedien- und Anzeige Komponenten
BJ	Bezugsjahr
BRD	Bundesrepublik Deutschland (eingesetzt zur Spezifizierung von Populationen)
CAD	rechnergestützte Konstruktion (v. engl. Computer Aided Design)
CAN	Bussystem des Fahrzeugs (v. engl. Controller Area Network)
CAVA	Softwarepaket zur Modellabsicherung (v. engl. Catia V5 Automotive Extensions Vehicle Architecture)
CAVE	Rechnergestützte virtuelle Umgebungssimulation (v. engl. Computer Assisted Virtual Environment)
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
d	Effektstärke von statistischen parametrischen Tests (Cohen's d)
dyn.	dynamisch
e. D.	eigene Darstellung
el.	elektrisch
F	Frau (eingesetzt zur Spezifizierung von Populationen)
FAT	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.
FE	Lkw-Fahrerfahrung
FK	Fahrzeugkombination
FL	Lkw-Fahrleistung
FOV	Sichtbereich (v. engl. Field Of View)
FP	Fahrzeugpunkt (statischer Messpunkt am Fahrzeug)
G	Geschlecht
GAUL	linker Augpunkt (Körperpunktdefinition nach Human Solutions 2013 Kapitel 6.11)
GAUM	Mittelaugpunkt (Körperpunktdefinition nach Human Solutions 2013 Kapitel 6.11)
GAUR	rechter Augpunkt (Körperpunktdefinition nach Human Solutions 2013 Kapitel 6.11)
GIP	Sichtzielschnittpunkt (v. engl. Gaze Intersection Point)
GPS	Global Positioning System
H	Hypothese
hor	horizontal
HSL	Hauptspiegel links (Spiegel Klasse II fahrerseitig)
HSR	Hauptspiegel rechts (Spiegel Klasse II beifahrerseitig)
ISO	International Organization for Standardization
J	Jahre (eingesetzt zur Spezifizierung von Populationen)
KH	Körperhöhe (ergonomisches Leitmaß)
KHG	Körperhöhengruppe
KHM	Krafthaltungsmodell zur Simulation von Fahrhaltungen des Menschmodells RAMSIS
KKOS	Kabinen-Koordinatensystem
KM	Körpermasse
KMG	Körpermaßgruppe
KMS	Kamera-Monitor-System zur Darstellung der indirekten Sicht
KP	Körperpunkt (statischer Messpunkt am Probandenkörper)
KVD	Kreisverkehrsdurchfahrt
KW	Knickwinkel
LA	Landstraßenanteil der Fahrstreckenzusammensetzung
Lkw	Lastkraftwagen



M	Mann (eingesetzt zur Spezifizierung von Populationen)
MB	Mercedes-Benz
MD	Median
MDD	Mediandifferenz
MJ	Modelljahr
MP	Messpunkt
MW	Mittelwert
MWD	Mittelwertdifferenz
N	Umfang der Gesamtstichprobe
n	Umfang einer Teilstichprobe
NAT	Nationalität
neg	negativ (-)
ORP	Mittelaugpunkt nach ECE-R46 und ISO 16505 (v. engl. Ocular Reference Point)
P	Perzentilwert
P05F	kleine Frau (vereinfachte Beschreibung der Körpercharakteristika eines Menschmodells, es wird das 5. Perzentil der Körperhöhe zugrunde gelegt )
p	Signifikanzwert eines statistischen Tests
P95M	großer Mann (vereinfachte Beschreibung der Körpercharakteristika eines Menschmodells, es wird das 95. Perzentil der Körperhöhe zugrunde gelegt)
Pkw	Personenkraftwagen
PO	Population
pos	positiv (+)
r	Effektstärke von statistischen nichtparametrischen Tests
rsp	Korrelationskoeffizient nach (Spearman 1910 S. 271 ff.)
RAMSIS	Rechnergestütztes Anthropometrisches Mathematisches System zur Insassensimulation
S	Sichtsituation
SAE	Verband der Automobilingenieure (v. engl. Society of Automotive Engineers)
SD	Standardabweichung (v. engl. Standard Deviation)
SH	Sehhilfe
SL	Stammlänge (in Bezug auf KH ergonomisches Leitmaß)
SgRP	Sitzreferenzpunkt (v. engl. Seating Reference Point)
ST	Stadtanteil der Fahrstreckenzusammensetzung
stat.	statisch
STS	Standardisierte Test-Statistik des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung der Bundesrepublik Deutschland
TU	Taillenumfang (ergonomisches Leitmaß)
UC	Anwendungsfall (v. engl. Use Case)
UDP	standardisiertes Protokoll zur Datenübertragung (v. engl. User Datagram Protocol)
UMTRI	University of Michigan Transportation Research Institute
V	Versuchsfahrzeug
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
ver	vertikal
VL	Versuchsleiter
VP	Versuchsperson
VR	Virtuelle Umgebungssimulation (v. engl. Virtual Reality)
VS	Verkehrssituation
WB	Wohnbevölkerung (eingesetzt zur Spezifizierung von Populationen)
WSL	Weitwinkelspiegel links (Spiegel Klasse IV fahrerseitig)
WSR	Weitwinkelspiegel rechts (Spiegel Klasse IV beifahrerseitig)

---

## Abstract

---

To fulfill the transportation task the driver has to steer the commercial vehicle through a challenging transport infrastructure. The driver-related vision issues, particularly the indirect vision for monitoring vehicle behavior during dynamic vision situations are of particular importance. The main requirements of the haulage contractor, who makes the decision to buy a new vehicle, are the cost-effective, fast and flexible transportation of goods. When designing commercial vehicles both requirements are to be considered.

Caused by the potential for fuel savings and the technology-related benefits for the truck drivers, it is of interest to replace conventional mirror systems of a commercial vehicle with camera-monitor systems (CMS). The electronic vision system is directly involved in the dynamic viewing interaction between driver, vehicle and environment and therefore needs to be designed according to ergonomic methods. For this purpose, information about the dynamic vision behavior of the truck driver while using conventional mirrors is needed. Firstly, there is the need for information about the driver's dynamic indirect vision areas to fulfill typical long-distance transport tasks. Secondly, the dynamic eye point scatter plot defined by the driver usage during dynamic visibility situations.

The raw vision data that is necessary for the analysis of dynamic vision interaction is collected within an individual designed road test. To record subject's representative visual information during the test run a 4-factorial experimental design is used. The main study is divided into three individual trials with different long-distance transport vehicles. In each test run, typical long-distance transport vision situations are performed by the selected subjects. The variation in body height and waist circumference is taken into account by the configuration of the subject sample. Static and dynamic vision data is recorded, processed and provided for analysis in an ergonomic database.

By analyzing the static and dynamic eye point scatter plots it is found that the two comparison groups differ design-relevant, both in the position of the mean values as well as in the spread of the distribution. Only the distributions of dynamic eye points and the associated gaze vectors can represent the real usage behavior of the moving vehicle. Therefore, dynamic eye point distributions have to be used for the ergonomic design of vehicle components that are integrated in a visual interaction.

The influences of the four factors on the dynamic eye point distributions are analyzed. The eye point positions of short and tall subjects differ in the vertical vehicle direction. No influence of the waist circumference on the position of the eye points in the longitudinal vehicle direction is detected. A vehicle variant related dependence of the eye point positions is confirmed by the analysis. The influence of the vision situation on the distribution of eye points is shown based on the frequency of mirror views, the average eye point positions and the distribution spread. Therefore, it is important to consider the usage-based weighting of the vision situations when designing vehicle components based on dynamic eye point positions and gaze vectors.

The truck-trailer-angle is identified as a predictor of the dynamic vision behavior in heavy-duty vehicles. To determine the dynamic indirect fields of view (FOVs) the vision data is therefore evaluated with a calculation model based on the truck-trailer-angle. This results in vision angle curves representing the used dynamic indirect fields of view of truck drivers in the evaluated vision situations. A dependence of these curves from the dynamic vision situations is shown. The analyzed test vehicles, which differ in the cab variant but not in the truck-trailer combination, have no influence on the used fields of view. Drivers with different body heights use the same FOVs from their individual eye point positions.

The findings of the analysis of dynamic vision situations are used for the ergonomic design of a camera-monitor system (CMS). The viewing angle-dependent image quality of the monitors is taken into consideration for the display adjustment depending on the dynamic eye point positions. The automated adaptation of the shown dynamic fields of vision is implemented through a truck-trailer-angle-dependent panning characteristic of the CMS. Thus, the advanced vision system is adapted to the ergonomic needs of truck drivers. The knowledge gained can be used for the ergonomic design of further vision-relevant systems. The optimization of driving posture and movement simulation is a further application of the recorded data and the obtained findings.

---

# 1 Einleitung

---

## 1.1 Motivation

---

Die Anforderungen an den Fahrer während der Transportaufgabe im Nutzfahrzeug unterscheiden sich maßgeblich von der Fahraufgabe im Personenkraftwagen. Das Nutzfahrzeug wird vom Fahrer zur Erfüllung der Transportaufgabe durch eine herausfordernde Verkehrsinfrastruktur bewegt. Die fahrerbezogenen Sichtthemen, insbesondere die indirekte Sicht zur Überwachung des Fahrzeugverhaltens, sind während dynamischer Sichtsituationen von besonderer Bedeutung. Die Hauptanforderungen des Spediteurs, der die Kaufentscheidung für ein neues Fahrzeug trifft, sind die kosteneffiziente, schnelle und flexible Bereitstellung von Transportgütern. Bei der Auslegung von Nutzfahrzeugen müssen beide Anforderungen berücksichtigt werden.

Für die Vielzahl von unterschiedlichen Transportaufgaben werden zunehmend, auf den individuellen Nutzungskontext hin optimierte, Fahrzeugvarianten entwickelt. In Abbildung 1-1 sind schwere Fernverkehrsfahrzeuge in einer typischen Fahrsituation auf der Autobahn dargestellt. Während der Langstreckenfahrt werden vom Fahrer die Spurhaltung und der Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen beurteilt. Bei Rangier- und Fahrtrichtungswechselmanövern steht die Überwachung des unmittelbaren Fahrzeugumfeldes im Vordergrund. Im Vergleich zum Pkw sind die Größe und Komplexität moderner Fernverkehrssattelzüge besonders bemerkenswert. Den fahrerbezogenen Sichtthemen aus der erhöhten Augpunktlage kommt im Nutzfahrzeug daher eine große Bedeutung zu.



Abbildung 1-1: Schwere Nutzfahrzeuge im Güterfernverkehr (Daimler 2014)

Durch Regularien des Gesetzgebers und Selbstverpflichtungen der Fahrzeughersteller werden für die Nutzfahrzeugindustrie CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele definiert. Eine Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes und die damit verbundene Verringerung des Kraftstoffverbrauchs ist ebenfalls ein wichtiger Faktor für die Kaufentscheidung des Spediteurs. Die konventionellen Spiegelsysteme können durch außerhalb des Fahrzeugs befestigte Kameras, eine elektronische Signalverarbeitung und in der Kabine angebrachte Monitore, ersetzt werden. Damit werden die Stirnfläche und der Kraftstoffverbrauch von Nutzfahrzeugen durch den Einsatz von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) zur Darstellung der indirekten Sicht maßgeblich reduziert. Das elektronische Sichtsystem wird direkt in die dynamische Sichtinteraktion zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt eingebunden und muss daher nach ergonomischen Methoden ausgelegt werden.

Mit dem zur Umsetzung eines KMS notwendigen Technologiewechsels entsteht eine Veränderung des Informationsflusses innerhalb der Sichtinteraktion des Fahrzeugführers mit dem Sichtziel über das jeweilige Sichtsystem. Während im Spiegelsystem die optische Signalübertragung zwischen Sichtziel und Augpunkt über die Spiegelfläche direkt gekoppelt ist, existiert bei einem Kamera-Monitor-System (KMS) keine direkte optische Kopplung zwischen Sichtziel und Augpunkt. Eine gezielte Kopfbewegung des Fahrers, die eine Veränderung seiner Augpunktlage mit sich bringt, führt bei einem Spiegelsystem zu einer Verschiebung des im Spiegel dargestellten Sichtbereiches. Dieselbe Kopfbewegung hat bei einem einfachen KMS, das lediglich die Sichtumgebung durch die Kamera aufnimmt und auf dem Monitor darstellt, keinen Einfluss auf den im Display wiedergegebenen Bereich der indirekten Sicht.

Zur ergonomischen Auslegung von KMS muss zunächst die dynamische Nutzung konventioneller Spiegelsysteme genauer betrachtet werden. Durch eine Analyse der Sichtinteraktion während dynamischer Sichtsituationen können die vom Fahrer benötigten Sichtbereiche und die dabei eingenommenen Augpunktlagen ermittelt werden. Auf Grundlage dieser dynamischen Sichtdaten wird eine, die Anforderungen der Fahrzeugführer zur Erfüllung der Transportaufgabe berücksichtigende Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) ermöglicht.

---

### 1.1.1 Transportaufgabe des Nutzfahrzeugs

---

Als Grundlage zur Beschreibung der Transportaufgabe innerhalb der Nutzfahrzeuglogistik wird die Definition der Fahraufgabe von Schweigert (2002 S. 18) verwendet: „Die Fahraufgabe besteht primär aus der von einem Menschen geregelten Fortbewegung mit Hilfe eines landgebundenen Kraftfahrzeuges von A nach B, unter der Berücksichtigung, dass keine anderen Gegenstände, außer der Fahrbahn berührt werden [...] Zusätzliche, individuelle Aspekte der Fahraufgabe liegen z.B. darin, dass der Fahrer möglichst wirtschaftlich, sportlich, komfortabel etc. unterwegs sein will.“ Im europäischen Nutzfahrzeugumfeld wird die Transportaufgabe, also der Transport von Waren von A nach B, zunehmend vom Spediteur und nicht mehr vom Fahrer geplant (vgl. Koch 2012 S. 187). Hauptanforderung des Spediteurs ist die kosteneffiziente, schnelle und flexible Bereitstellung von Transportgütern (vgl. Hoepke & Brähler 2010 S. 1). Damit wird von Seiten des Spediteurs festgelegt, dass der Berufskraftfahrer mit seinem Fahrzeug möglichst wirtschaftlich unterwegs sein muss. Das Komfortempfinden oder die temporäre Leistungsanforderung stehen demnach bei der Bewältigung der Transportaufgabe nicht an erster Stelle.

Für die Vielzahl unterschiedlicher Transportaufgaben werden auf den Nutzungskontext hin optimierte Fahrzeugvarianten entwickelt. Es kann nach der Einsatzkategorie zwischen Fernverkehrs-, Verteilerverkehrs- und Baustellenverkehrsfahrzeugen differenziert werden (vgl. Hoepke & Brähler 2010 S. 1; Ziegler 2008 S. 198). Im Fernverkehrsumfeld wird nach der Fahrzeugkombination zwischen Einzelfahrzeug, Glieder- und Sattelzugkombination unterteilt (Braun & Kolb 2008 S. 31 ff.; Brähler 2010 S. 111 ff.). Die in Abbildung 1-2 dargestellte Referenz-Sattelzugkombination, bestehend aus Zugmaschine und Sattelaufleger, repräsentiert das wichtigste Fernverkehrsfahrzeug im europäischen Markt (vgl. Shell 2010 S. 19 f.). Bei Ortsdurchfahrten oder Rangiermanövern müssen auch mit Fernverkehrsfahrzeugen direkte Fahrtrichtungsänderungen auf begrenzter Infrastrukturfäche durchgeführt werden. Sattel- oder Gliederzüge sind aufgrund dieser Anforderung und ihrer beträchtlichen Gesamtzuglänge aus einer Kombination von Zugfahrzeug und Anhänger aufgebaut. Das Abknicken des Anhängers bei Fahrtrichtungsänderungen erhöht die Komplexität der Fahrdynamik und erschwert die Zuordnung der einzelnen Fahrzeugelemente bei der Überwachung der Spurhaltung durch den Fahrer.



Abbildung 1-2: Referenz-Sattelzugkombination in abgeknicktem Zustand (Daimler 2014)

Um die Fahrzeugkombinationen noch individueller auf die Anforderungen der Kunden abzustimmen können die Parameter der Kabinenvariante, wie Kabinenbreite, -höhe, -länge und -aufsetzhöhe, Formeln der Achsanordnung, wie Achsanzahl, -lenkung, -antrieb, sowie Motor- und Getriebevarianten etc. variiert werden (vgl. Daimler 2011a S. 55 ff.; Daimler 2011b S. 3 ff.). Der entstehenden Vielfalt an Fahrzeugvarianten wird mit universellen Gleichteilmodulen, wie dem Spiegelmodul, das bei allen Kabinenhöhen, -längen und Aufsetzhöhen eingesetzt werden kann, begegnet (Daimler 2011b S. 18).

Die systematische Kostenoptimierung von Produktionsbetrieben führt seit den 80er Jahren zu einem Abbau der internen Lagerhaltung. Durch eine enge Bindung zwischen Produzent und Lieferant (vgl. Koch 2012 S. 245) können die notwendigen Lagerkapazitäten auf die „Just-in-Time“ anliefernden Lastkraftwagen oder die im Umfeld der Produktionsstätten angesiedelten Logistikzentren der Speditionen, verteilt werden. Durch diese enge Verknüpfung von Produktion und Logistik kann bei Ausfall eines Gliedes der Lieferkette ein hoher volkswirtschaftlicher Schaden entstehen. Das Flotten- und Zeitmanagement, sowie die dazu notwendigen Telematikkomponenten (vgl. Kasties 2013 S. 945 ff.), gewinnen für die Speditionen an Bedeutung (vgl. Göpfert et al. 2013 S. 5). Der Fahrer stellt

---

für den Spediteur im komplexen Verkehrsgeschehen, mit weiterhin zunehmender Verkehrsdichte (Maierhofer 2011 S. 53) und strikt reglementierten Lenkzeiten (EGV Nr. 561/2006 A 6 f.), eine hohe Kostenquelle und ein potientiellies Ausfallrisiko dar. Er ist jedoch auch einer der größten verbliebenen Stellhebel zur Kraftstoffeinsparung (vgl. AISÖ 2010 S. 1 ff.).

Der Stellenwert der Transportaufgabe bei der Konzeptauslegung eines Nutzfahrzeugs wird besonders augenscheinlich, wenn die geometrischen Abmessungen des Referenz-Sattelzugs betrachtet werden (vgl. Abbildung 1-2 & Abbildung 1-3). Die höchstzulässigen Längen-, Breiten- und Höhenabmessungen (vgl. R 96/53/EG 1996 § 13 ff.) werden voll ausgeschöpft (Breuer & Kopp 2013 S. 60). Das größte Volumen wird vom Frachtraum des Sattelauflegers eingenommen. Die Zugmaschine ist so ausgelegt, dass sie einen möglichst geringen Beitrag zur Gesamtzuglänge leistet (vgl. Frank 2012 S. 26). Daher wird die Maßkonzeption der Fahrerkabine auf einen niedrigen Längenbeitrag optimiert. Die konzeptionelle Augpunktlage der Lkw-Fahrer wird durch diese Priorisierung festgelegt (Cook et al. 2010 S. 43). Eine körpermaßbedingte Variation der Augpunktlagen findet vornehmlich in Fahrzeughochrichtung statt. Das Fahrgestell und der Antriebsstrang des Nutzfahrzeugs sind auf eine effiziente Transportleistung (Daimler 2011a S. 24 ff.) und nicht auf einen hohen Fahrkomfort optimiert. Daher werden das Fahrerhaus und der Fahrerarbeitsplatz mit Schwingungen, die durch das Fahrbahnprofil angeregt werden, beaufschlagt.



Abbildung 1-3: Vergleich der direkten Sicht aus einer Mittelklasselimousine und dem Referenz-Sattelzug (e. D. aus Daimler 2014)

In Abbildung 1-3 sind die statischen Augpunktlagen und die Sichtkegel der Fahrer einer Mittelklasselimousine (GAUM Pkw) und des Referenz-Sattelzuges (GAUM Lkw) dargestellt. Die Fahrzeuge sind in x-Richtung auf die Augpunktlage normiert und auf der Fahrbahnebene platziert. Der große Abstand der beiden Augpunktlagen in z-Richtung und die unterschiedlichen Fensteröffnungsflächen der Karosserie sind offensichtlich (vgl. Cook et al. 2010 S. 44). Der Lkw-Fahrer hat im Unterschied zum Pkw-Fahrer, aufgrund der Sichtverdeckung durch das Ladevolumen, keine Möglichkeit der direkten Sicht nach hinten. Auch der Bereich direkt vor und seitlich neben dem Fahrerhaus kann, bedingt durch die hohe Aufsetzhöhe, nicht direkt eingesehen werden (Tait & Southall 1998 S. 9 f.; Cook et al. 2011 S. 42 ff.). Diese Sichteinschränkungen müssen vom Lkw-Fahrer durch ein dynamisches Sichtverhalten unter Verwendung der Spiegel kompensiert werden.

Der Lkw hat bedingt durch seine Masse von maximal 40 t (vgl. R 96/53/EG 1996 A1), der Begrenzung der maximal abrufbaren Fahrtgeschwindigkeit von 90 km/h (Braun & Kolb 2008 S. 74) und der Notwendigkeit zum wirtschaftlichen Kraftstoffeinsatz (vgl. AISÖ 2010 S. 1 ff.) eine begrenzte Möglichkeit längsdynamische Beschleunigungsmanöver durchzuführen. Er muss daher vom Kraftfahrer mit Hilfe der optischen Abstandseinschätzung zwischen seinem Fahrzeug, anderen Verkehrsteilnehmern und den Fahrspurbegrenzungen vorausschauend bewegt werden. Bei querdynamischen Fahrmanövern ist aufgrund der Fahrzeugabmessungen und der Komplexität der Fahrzeugkombination die Einhaltung der Soll-Spur des Auflegers zu kontrollieren (Southall et al. 1998 S. 14). Das größere, trägere und komplexere Nutzfahrzeug muss, zur Erfüllung der Transportaufgabe, vom Fahrzeugführer durch dieselbe Verkehrsinfrastruktur wie der vergleichsweise kleine, agile und kompakte Personenkraftwagen bewegt werden. Da aus dem Lkw die direkte Sicht nach hinten nicht gegeben ist, erfolgt die Spurhaltungsüberwachung und Abstandsschätzung des herannahenden Verkehrs über Sichtsysteme zur indirekten Sicht (Tait & Southall 1998 S. 9 f.). Damit hat die indirekte Sicht in Nutzfahrzeugen im Vergleich zu Personenkraftwagen einen höheren Stellenwert und bedarf bei der Auslegung besonderer Beachtung.

---

### 1.1.2 CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele als Wegbereiter für neue Technologien

---

Die Europäische Kommission hat im Jahr 2011 einen Fahrplan zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen vorgelegt (vgl. KOM 2011 112 S. 4 ff.). Demnach soll bis zum Jahr 2050 der Ausstoß von Treibhaus-



gasen um 80% (Bezugsjahr 1990) verringert werden. Die Effizienzsteigerung des Güterfernverkehrs spielt zum Erreichen der Reduktionsziele eine entscheidende Rolle (vgl. KOM 2011 112 S. 7; KOM 2010 265 S. 7 ff.). Im Jahr 2008 wurde vom Europäischen Automobilherstellerverband (ACEA) eine Selbstverpflichtung der Nutzfahrzeughersteller zur CO<sub>2</sub>-Reduktion veröffentlicht (Renschler 2008 S. 1). Diese Verpflichtung beinhaltet, bis zum Jahr 2020, eine durchschnittliche Verbrauchssenkung um 20% pro Tonnenkilometer (Bezugsjahr 2005). Da die reale Entwicklung der Flottenverbräuche nicht den selbstgesteckten Zielen der Fahrzeughersteller entspricht (vgl. Thom 2006 S. 188), werden in den vier wichtigsten internationalen Märkten gesetzliche Grenzwerte für den CO<sub>2</sub>-Ausstoß von schweren Nutzfahrzeugen ausgearbeitet (vgl. Abbildung 1-4; Ernst et al. 2013 S. 393 f.). Diese Regulierungen, deren Nichteinhaltung mit Strafzahlungen durch die Automobilindustrie geahndet wird (Ernst et al. 2013 S. 390), sollen in den Jahren 2014 bis 2016 in Kraft treten.

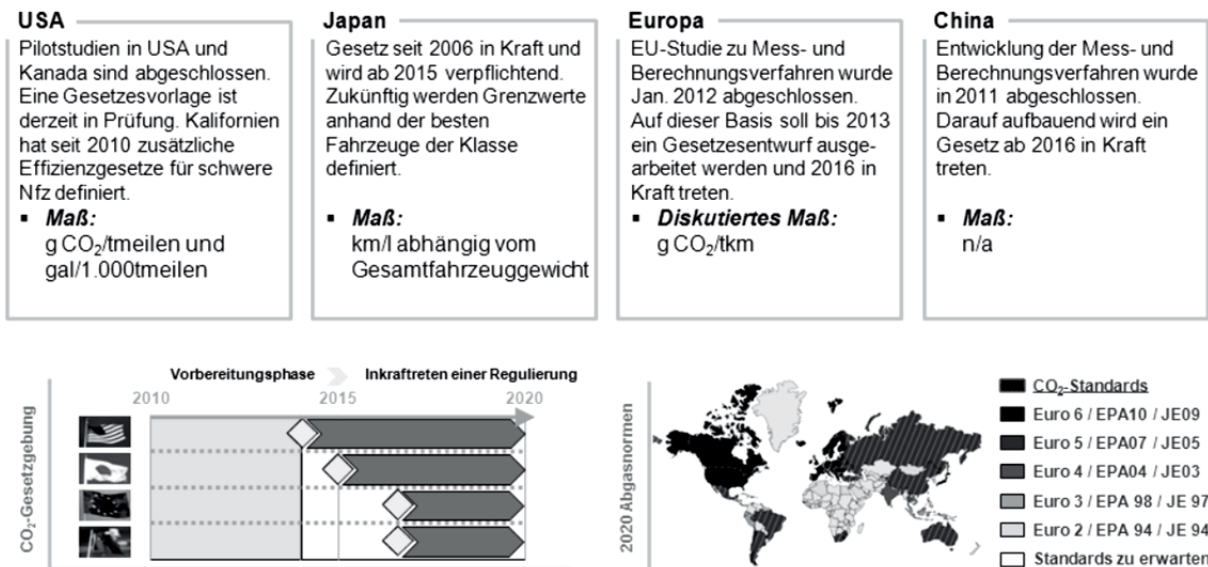


Abbildung 1-4: Globale CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge (Ernst et al. 2013 S. 393)

Nach Breuer und Kopp (2013 S. 60 f.) fährt ein Fernverkehrssattelzug im Jahr durchschnittlich 150.000 km und verbraucht dabei im Mittel 49.500 l Diesel. Der Dieselpreis für deutsche Großspeditionen lag in den letzten drei Jahren im Durchschnitt bei 1,34 € (DESTATIS 2014 S. 28). Damit muss der Spediteur für einen durchschnittlichen Lkw jährlich 66.309,36 € an Kraftstoffkosten bezahlen und könnte bei einer 1%igen Verbrauchsreduktion jährlich 663,09 € einsparen. Durch diesen betriebswirtschaftlichen Zusammenhang kann abgeschätzt werden wieviel ein Kunde für eine Verbrauchsminderungs-Maßnahme bezahlen würde und demzufolge, wieviel eine Maßnahme mit bekanntem CO<sub>2</sub>-Einsparungspotential kosten darf um sie rentabel an den Spediteur verkaufen zu können.

Die Fahrzeughersteller haben das Interesse durch geeignete Maßnahmen die vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele zu erreichen. Dabei kann die notwendige CO<sub>2</sub>-Reduktion durch eine Verringerung der Fahrwiderstände umgesetzt werden. Die aufzubringende Antriebskraft ( $F_{An}$ ) setzt sich, bei fernverkehrstypischer Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit, aus dem Rollwiderstand ( $F_{Ro}$ ), dem Steigungswiderstand ( $F_{St}$ ) und dem Luftwiderstand ( $F_L$ ) zusammen (vgl. Formel (1); Breuer & Kopp 2013 S. 37 ff.).

$$F_{An} = F_{Ro} + F_{St} + F_L \quad (1)$$

In Abbildung 1-5 sind die Anteile der Fahrwiderstände für einen 40 t Sattelzug in Abhängigkeit von verschiedenen Fahrstreckenprofilen dargestellt. Bei ebener Autobahnfahrt liegt der Anteil des Luftwiderstands bei 40%, auf ebener Landstraße lediglich bei 16%. Diese starke Fahrstreckenabhängigkeit lässt sich mit dem quadratischen Beitrag der Geschwindigkeit zum Luftwiderstand (vgl. Formel (2)) erklären. Die Streckenprofile unterscheiden sich in der jeweiligen Durchschnittsgeschwindigkeit. Da der Anteil des Luftwiderstands am Gesamtfahrwiderstand bei hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten am größten ist, sind aerodynamische Optimierungsmaßnahmen bei Fernverkehrsfahrzeugen am effektivsten (Kopp & Frank 2013 S. 653).

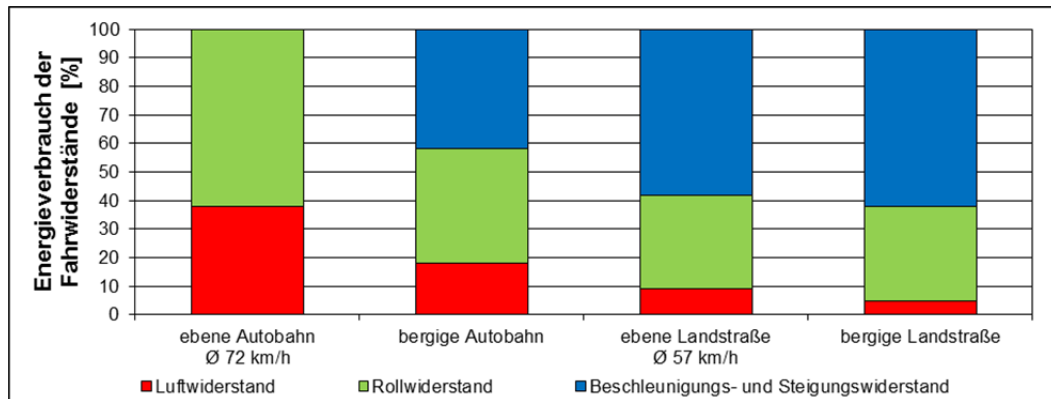


Abbildung 1-5: Energieverbrauch zur Überwindung der Fahrwiderstände eines 40 t Sattelzuges (e. D. nach Kopp & Frank 2013 S. 654)

Neben der Fahrzeuggeschwindigkeit ( $v$ ) gehen in die Formel des Luftwiderstandes (2) noch der Luftwiderstandsbeiwert ( $c_w$ ), der die aerodynamische Güte eines Fahrzeuges beschreibt, die Stirnfläche des Fahrzeuges ( $A$ ) und die Luftdichte ( $\rho$ ) ein (Breuer & Kopp 2013 S. 54).

$$F_L = c_w \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (2)$$

Aerodynamische Einzelmaßnahmen zur Luftwiderstandsoptimierung und deren bewertete Potentiale werden in der Fachliteratur beschrieben (vgl. Devesa & Indinger 2011 S. 33 ff.; Frank 2012 S.23 ff.; Kopp & Frank 2013 S. 675 ff.) Eine Substitution der Haupt- und Weitwinkelspiegel durch ein Kamera-Monitor-System (KMS) ist in diesem Zusammenhang eine herausragende Maßnahme, da dadurch sowohl die Stirnfläche des Fahrzeuges ( $A$ ) reduziert als auch der Luftwiderstandsbeiwert ( $c_w$ ) optimiert werden. Zusätzlich kann durch den Entfall der Außenspiegel das Windgeräusch und die Verschmutzung der Seitenscheiben maßgeblich reduziert werden (vgl. Fornell-Fagerström & Gardlund 2012 S. 40 f.; Kopp & Frank 2013 S. 720 ff.; Helfer 2013 S. 536 ff.). Bei konzeptbedingter direkter Anströmung der Spiegelanbindungsgebiete wird das nachgewiesene Kraftstoffeinsparpotential eines KMS mit 2,9% beziffert (vgl. Devesa & Indinger 2011 S. 59).

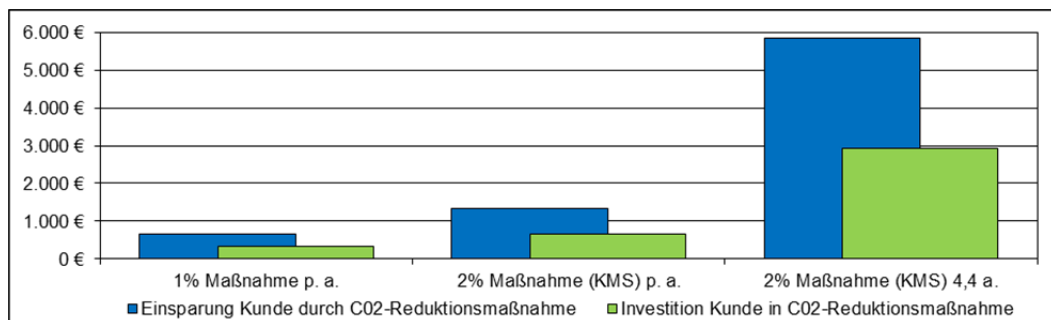


Abbildung 1-6: Einsparung des Kunden durch CO<sub>2</sub>-Reduktionsmaßnahmen am 40 t Sattelzug

Geht man von einer realen Verbrauchsreduktion durch ein am Serienfahrzeug umgesetztes KMS im Kundenbetrieb von 2% aus, kann der Spediteur mit einem solchen System jährlich 1.326,18 € an Kraftstoffkosten einsparen (vgl. Abbildung 1-6). In der aktuellen Shell Lkw-Studie wird für Sattelzugmaschinen in Deutschland eine durchschnittliche Haltedauer von 4,4 Jahren ausgewiesen (Shell 2010 S. 30), was zu einer Kostenersparnis, durch die 2%-Maßnahme, von 5.835,19 € über die Nutzungsdauer beim Erstkunden führt. Der Spediteur wird einen Anteil seiner Einsparung für die Maßnahme investieren und somit den erzielbaren Verkaufspreis der CO<sub>2</sub>-Reduktionsmaßnahme definieren.

Die CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele können, in Verbindung mit den Kraftstoffeinsparpotentialen des Kunden, zum Technologiewandel vom konventionellen Spiegelsystem zum neuartigen Kamera-Monitor-System (KMS) beitragen. Durch das nachgewiesene Einsparpotential besteht die Möglichkeit diese sichtverbessernde Maßnahme für den Fahrer nutzbar und vom Spediteur unterstützt in Fernverkehrsfahrzeuge zu integrieren. Um das reale Sichtverhalten des Fahrzeugführers zu berücksichtigen müssen dazu ergonomische Auslegungs- und Absicherungsmethoden herangezogen werden.

### 1.1.3 Etablierung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS)

Zur Umsetzung eines Kamera-Monitor-Systems (KMS) soll das konventionelle Spiegelsystem (vgl. ECE-R 46/02 2009 Abs. 6.1) eines Nutzfahrzeugs durch die außerhalb des Fahrzeugs befestigten Kameras (vgl. Nr. 20 in Abbildung 1-7; Bothe & Wohlfarth 2014 S. 5), eine elektronische Signalverarbeitung und die in der Kabine angebrachten Monitore ersetzt werden (vgl. ECE-R 46/02 2009 Abs. 2.1.2 & 6.2.2). Aufgrund der Regularien für Sichtsysteme zur indirekten Sicht ist momentan lediglich der Ersatz der Front- und Rampenspiegel (Klasse V und VI nach ECE-R 46/02 2009 Abs. 15.2.4.2) durch KMS zulassungsfähig (vgl. ECE-R 46/02 2009 Abs. 15.2.1.1.2). Durch den Ersatz der Haupt- und Weitwinkelspiegel (Klasse II und IV) können, da sie einen nennenswerten Anteil der Frontfläche des Fahrzeugs definieren, jedoch die größten Kraftstoffreduktionen erzielt werden (vgl. Kapitel 1.1.2; Devesa & Indinger 2011 S. 59).

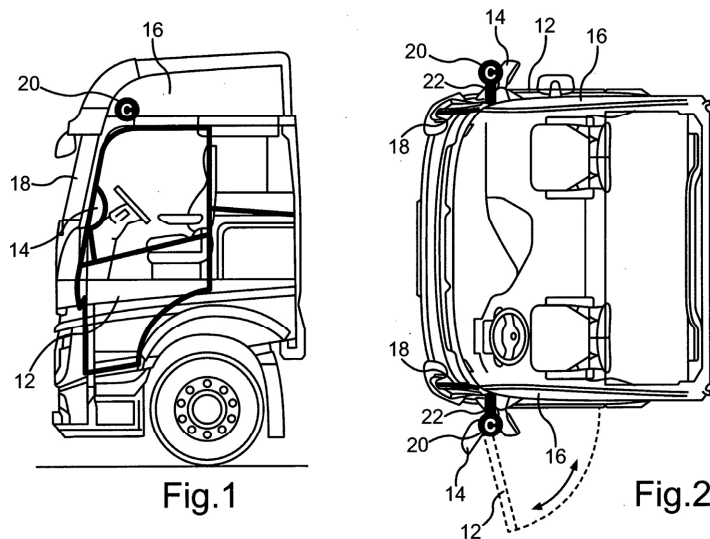


Abbildung 1-7: Komponenten eines Kamera-Monitor-Systems (KMS) für Nutzfahrzeuge (Bothe & Wohlfarth 2014 S. 5)

Die aktuellen Spiegelsysteme behindern nicht nur die Umströmung des Fahrzeugs sondern auch die direkte Sicht aus dem Fahrzeug (vgl. Abbildung 1-8; Tait & Southall 1998 S. 10; Fornell-Fagerström & Gardlund 2012 S. 41 f.). Für die Zulassung von Nutzfahrzeugen ist in der BRD zur Beurteilung der Verdeckung der direkten Sicht die „Richtlinie für die Sicht aus Kraftfahrzeugen“ (StVZO §35b 1987) heranzuziehen. Diese Richtlinie beschreibt die maximal zulässigen Sichtverdeckungswinkel, wobei Spiegeleinrichtungen für die Berechnung ausdrücklich ausgenommen sind. Die maximale Größe von Spiegelsystemen ist somit von Seiten des Gesetzgebers nicht reglementiert, was zu einer kontinuierlichen Vergrößerung der durch die Spiegel hervorgerufenen Sichtverdeckungen führt (vgl. Bothe et al. 2012b S. 5). Bei der Dimensionierung von Fahrzeugspiegeln liegt ein Zielkonflikt zwischen bestmöglicher indirekter Sicht und geringstmöglicher Verdeckung der direkten Sicht vor.



Abbildung 1-8: Verdeckung der direkten Sicht durch die fahrerseitigen Haupt- und Weitwinkelspiegel eines Fernverkehrsfahrzeugs (e. D. aus Daimler 2014)



Um die Kundenansprüche zu befriedigen gehen die dargestellten Sichtbereiche und die dazu notwendigen konstruktiven Spiegeloberflächen aktueller Spiegelsysteme weit über die gesetzlich geforderten Sichtfelder (ECE-R 46/02 2009 Abs. 15.2.4.2) hinaus (vgl. Bothe et al. 2012a S. 1638; Fornell-Fagerström & Gardlund 2012 Appendix D). Zusätzlich führt die aerodynamische Optimierung der Haupt- und Weitwinkelspiegel (Frank 2012 S. 30) zu großflächigen sichtblockierenden Verkleidungsteilen (Cook et al. 2010 S. 97) und einer sichtverschlechternden zurückgesetzten Anbindungsposition der Spiegel. Durch die Etablierung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) können die beschriebenen Nachteile weitgehend reduziert werden.

In aktuellen Projekten zur Fahrerassistenz, wie dem Antikollisionssystem „PRORETA“ (Isermann et al. 2012, S. 632 ff.) oder der „Kooperativen Automation“ (Hakuli et al. 2012 S. 641 ff.) werden Systeme, die im Bereich des assistierten und semiautomatisierten Fahrens (vgl. Abbildung 1-9) einzuordnen sind, entwickelt. Dabei soll der Fahrer, trotz leistungsfähiger Automation (Hakuli et al. 2012 S. 649) des Fahrzeugs, über die Mensch-Maschine-Schnittstelle im Regelkreis gehalten werden.

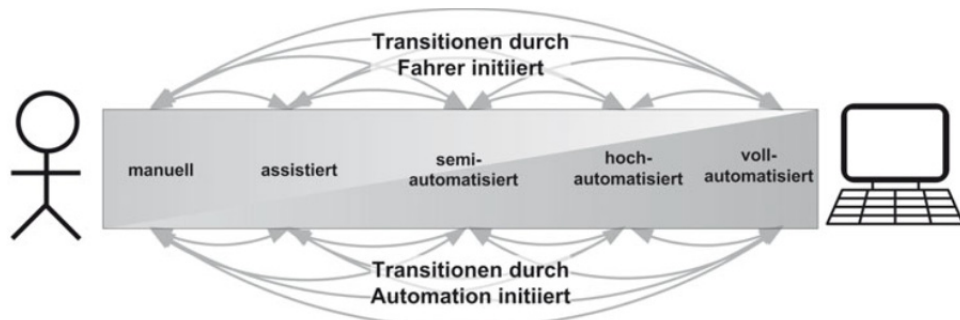


Abbildung 1-9: Automationsgrade in der Mensch-Maschine-Interaktion (Hakuli et al. 2012 S. 645)

Bei automatisierten Fahrzeugen werden zur Umfeldüberwachung mit Objektklassifikatoren in Echtzeit ausgewertete Videodaten (Isermann et al. 2012, S. 639) verwendet. Die Kameras eines KMS können in diesem Zusammenhang als zusätzliche Sensoren (vgl. Hughes et al. 2011 S. 502) eingesetzt werden. Mit ihnen ist beispielsweise eine Detektion von Fußgängern oder Radfahrern in für den Fahrer nicht einsehbaren Bereichen, den sog. „Blind Spots“ (vgl. Cook et al. 2010 S. 87 ff.; Cook et al. 2011 S. 141 ff.), möglich. Warnmeldungen können auf dem Monitor, situationsabhängig und kontaktanalog zur Bildinformation und damit für den Fahrer intuitiv wahrnehmbar, angezeigt werden. Der Einsatz von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) kann somit zur Vermeidung von fatalen Kreuzungsunfällen (Cook et al. 2010 S. 105 ff.) beitragen. Es ist eine Unterstützung des Fahrers während der Stufen des manuellen, assistierten und semi-automatisierten Fahrens (vgl. Abbildung 1-9) möglich.

Mit Blick auf das Potential der CO<sub>2</sub>-Reduktion, die Verminderung von Windgeräuschen, die Verbesserung der direkten Sicht und die technologische Wegbereitung zur Integration neuartiger Fahrerassistenzsysteme, wurde eine Integration der Zulassungsanforderungen an Kamera-Monitor-Systeme (KMS) in die ECE-R46 (ECE-R 46/02 2009) initiiert. Zur Definition der technischen Grundanforderungen wurde eine Arbeitsgruppe, die durch die International Organization for Standardization (ISO) administriert wird, (ISO/TC 22/SC 17/WG 2) gegründet. Diese Arbeitsgruppe setzt sich aus internationalen Vertretern von Regierungsorganisationen, technischen Prüfdiensten, Automobilverbänden, Fahrzeugherstellern und Systemlieferanten zusammen und hat die Aufgabe die minimalen Sicherheits-, Ergonomie- und Leistungsanforderungen sowie die zugehörigen Testmethoden für ein KMS zum Ersatz der Spiegel Klasse I bis IV (ECE-R 46/02 2009 Abs. 15.2.4.2) zu definieren und im ISO-Standard 16505 (ISO/FDIS 16505 2014) zu dokumentieren (Herrmann & Scheuer 2011 S. 3). Der ISO 16505 wird als grundlegendes technisches Dokument zur Änderung der ECE-R46 herangezogen. Durch dieses Vorgehen werden Kamera-Monitor-Systeme (KMS) in absehbarer Zeit zulassungsfähig und deren Entwicklung bei Fahrzeugherstellern und Systemlieferanten angestoßen. Aufgrund der Relevanz und Komplexität der indirekten Sicht ist bei Nutzfahrzeugen auf eine ergonomische Auslegung der KMS zu achten (vgl. Bothe et al. 2013d S.9)

Die Relevanz der Entwicklung von elektronischen Spiegelerersatzsystemen wird durch die Vielzahl aktueller Anmeldungen von Patentansprüchen und Offenlegungsschriften (vgl. Lang & Kunz 2012; Lang et al. 2012a; Lang et al. 2012b; Bothe et al. 2012a; Bothe et al. 2013e; Bothe & Wohlfarth 2014) verdeutlicht. Da die grundlegenden technischen Randbedingungen durch die ISO 16505 und die ECE-R46 für alle Fahrzeughersteller einheitlich definiert sind, werden vor allem im Nutzfahrzeugumfeld die ergonomischen fahrerbezogenen Aspekte für die zukünftige Marktdurchdringung von KMS

eine entscheidende Rolle spielen. So ist in einer aktuellen Offenlegungsschrift (Bothe et al. 2013e S. 1 ff.) die durch die ISO 16505 (ISO/FDIS 16505 2014 Abs. 6.2 und B2.4) gewünschte aber nicht geforderte Funktionalität, der von Fahrzeugparametern abhängigen Steuerung des dargestellten Sichtbereichs, beschrieben. Es werden Steuerungsparameter wie der Knickwinkel zwischen Zugmaschine und Auflieger, die Fahrzeuggeschwindigkeit und der Lenkradwinkel zur automatisierten Manipulation des angezeigten Sichtbereichs vorgeschlagen. Die aktive Ansteuerung ist notwendig, da bei einem Kamera-Monitor-System (KMS), im Unterschied zum Spiegelsystem, keine direkte optische Kopplung zwischen Sichtziel und Augpunkt vorliegt. Zur Entwicklung eines KMS, muss zunächst die Nutzung der konventionellen Spiegelsysteme durch den Fahrzeugführer genauer betrachtet werden. Vom dynamischen Nutzungsverhalten des Fahrers können die Parameter zur sichtsituationsabhängigen Verschiebung des dargestellten Sichtbereichs abgeleitet werden.

#### 1.1.4 Dynamische Nutzung konventioneller Spiegelsysteme

Abhängig von der jeweiligen Einzelphase einer komplexen Sichtsituation, wie der in Abbildung 1-10 dargestellten Kreisverkehrsdurchfahrt, sind für den Lkw-Fahrer zu diesem Zeitpunkt unterschiedliche Bereiche des Fahrzeugumfelds von besonderer Relevanz und werden daher mit Hilfe der Spiegelsysteme kontrolliert (Bothe et al. 2013b S. 298 ff.).

Sichtphase 1 ist vergleichbar mit dem Verhalten während der Geradeausfahrt auf der Landstraße. Der Fahrer überprüft bei relativ hoher Fahrzeuggeschwindigkeit durch kurze Kontrollblicke in beide Hauptspiegel den Geradeauslauf seines Aufliegers und dessen Position innerhalb der Fahrspur. Sichtphase 2 repräsentiert mit der Annäherung an die Haltelinie den Übergang zu den langsamen Phasen der Kreisverkehrsdurchfahrt. Die Umgebungssituation mit weiteren vorfahrtsberechtigten Verkehrsteilnehmern wird mit Hilfe von Blicken der direkten Sicht bewertet. Vor der Einfahrt in den Kreisverkehr wird die unmittelbare Umgebung des Nutzfahrzeugs über die Nahbereichsspiegel kontrolliert. Sichtphase 3 ist die erste der drei Hauptphasen der Kreisverkehrsdurchfahrt. Sie beschreibt einen Fahrtrichtungswechsel nach rechts und ist daher mit der Sichtsituation des Abbiegens nach rechts vergleichbar. Bei niedriger Geschwindigkeit wird ein negativer Knickwinkel zwischen Zugfahrzeug und Sattelauflieger erzeugt. Der Fahrer überprüft zu diesem Zeitpunkt die Einhaltung der Fahrspurbegrenzung auf der rechten Aufliegerseite. Auf der Fahrerseite wird die Sicht auf die relevanten Bereiche der Räder und der Spurmarkierungen durch die ausschwenkende Vorderkante des Anhängers blockiert.

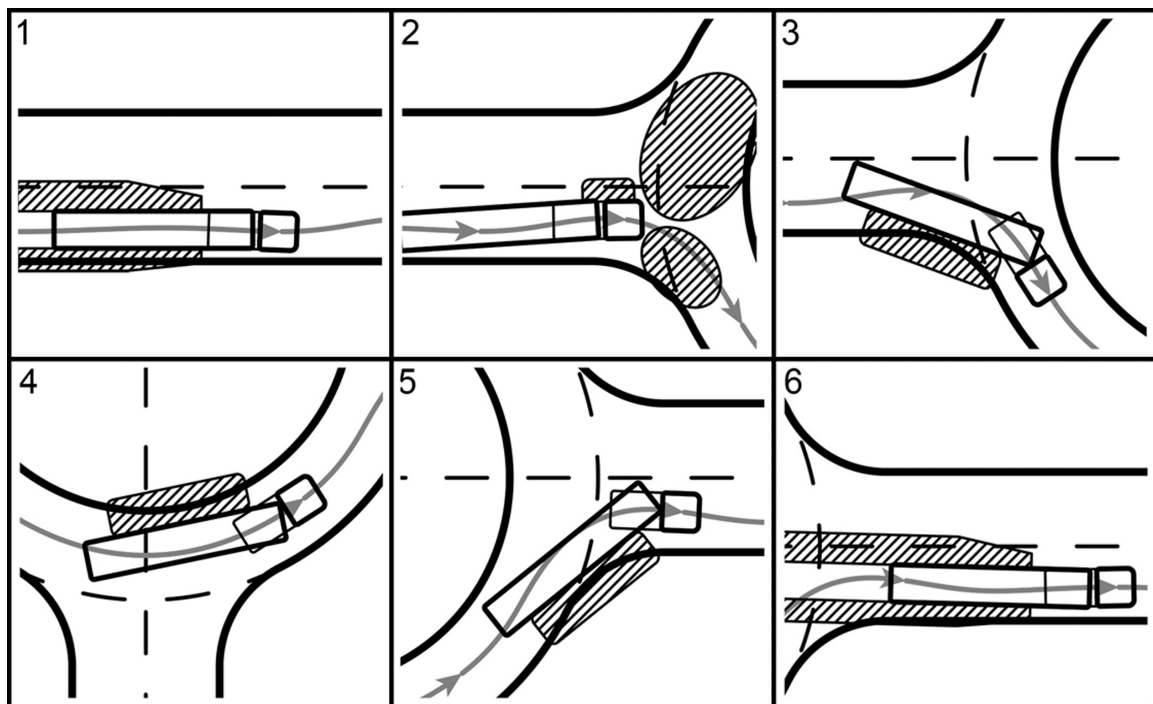


Abbildung 1-10: Dynamische, vom Fahrer genutzte, Sichtbereiche (schraffierte Flächen) am Beispiel der Kreisverkehrsdurchfahrt (Bothe et al. 2013b S. 298 ff.)

Sichtphase 4 ist durch einen Fahrtrichtungswechsel nach links charakterisiert. In Abhängigkeit vom Kreisverkehrsdurchmesser kann diese Phase mit einem Abbiegen nach links oder der Durchfahrt einer Linkskurve verglichen werden. Es baut sich ein positiver Knickwinkel auf. Der zur Überprüfung der Spurhaltung relevante Sichtbereich wechselt von der rechten auf die linke Seite. Bei Sichtphase 5 handelt es sich wieder um einen Fahrtrichtungswechsel nach rechts und den damit verbundenen Wechsel des Sichtbereichs auf die rechte Fahrzeugseite. Wie bei den beiden vorausgegangenen Hauptphasen ist auch in Phase 5 der relevante Sichtbereich direkt dem stark geknickten Auflieger zugeordnet. Sichtphase 6 beschreibt den Übergang von der Kreisverkehrsdurchfahrt zur Geradeausfahrt. Um bei zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit den Geradeauslauf des Aufliegers und den nachfolgenden Verkehr zu beobachten, verschiebt sich der genutzte Sichtbereich vom Nahfeld in Fahrzeuglängsrichtung nach hinten und verteilt sich wieder wie bei der einleitenden Geradeausfahrt zu beiden Seiten des Aufliegers. Resümierend kann für die Kreisverkehrsdurchfahrt als Repräsentant einer komplexen Sichtsituation eine von der Geschwindigkeit abhängige Verschiebung des genutzten Sichtbereichs in Fahrzeuglängsrichtung und eine vom Knickwinkel abhängige Verschiebung des relevanten Sichtbereichs in Fahrzeuquerrichtung beobachtet werden.

Die in der ECE-R46 beschriebenen statischen Sichtfelder der Klasse II Spiegel (ECE-R 46/02 2009 Abs. 15.2.4.2) decken lediglich die genutzten Sichtbereiche der Sichtphasen 1 und 6 (Geradeausfahrt) aus Abbildung 1-10 ab. Um die relevanten Sichtbereiche der Phasen mit großen Knickwinkeln einsehen zu können, muss der Fahrer durch gezielte Kopfbewegungen seine Augpunktlage relativ zum Spiegel verschieben (vgl. Bothe et al. 2012a S. 1638, Fornell-Fagerström & Gardlund 2012 S. 53). In Abbildung 1-11 ist die beschriebene Abhängigkeit zwischen der Augpunktlage, der Spiegelfläche und dem dargestellten Sichtbereich anhand einer CAD-Simulation visualisiert. Im linken Bildausschnitt ist die Fahrhaltung des RAMSIS-Menschmodells samt Augpunktlage und Sichtstrahl-orientierung dargestellt. Im rechten Bildausschnitt zeigt das Rendering die Fahrersicht aus der Augpunktlage in den Spiegel. Zur Beurteilung des jeweils dargestellten Sichtbereichs und zur Zuordnung zum Fahrzeug ist der Fahrzeugaufleger in violett, ein überholendes Fahrzeug in grün, das Sichtfeld Klasse II in orange, das Sichtfeld Klasse IV in gelb und der Himmel in blau dargestellt.

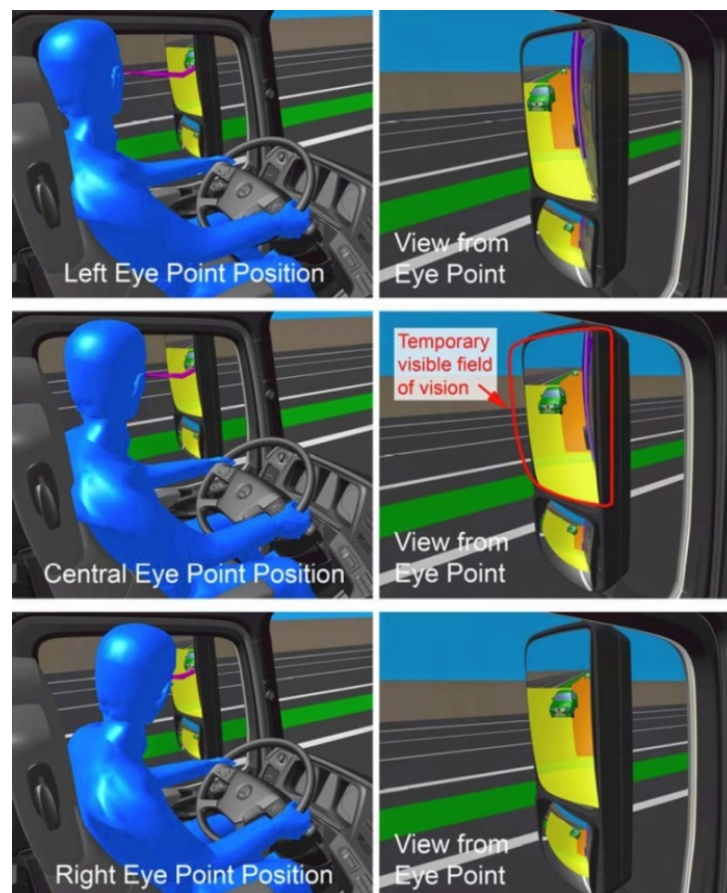


Abbildung 1-11: Simulation der fahrerinitiierten dynamischen Anpassung der Sichtbereiche in konventionellen Spiegelsystemen nach (Bothe et al. 2012a S. 1638)

Die Interaktion zwischen Fahrer und Spiegel zur gezielten Verschiebung des dargestellten Sichtbereichs basiert auf einem vom Fahrer erlernten mentalen Modell des Sichtsystems und wird aufgrund des größeren Effekts vornehmlich im Hauptspiegel (Klasse II) und nicht im Weitwinkelspiegel (Klasse IV) angewendet. Das Modell beinhaltet den positionierten Augpunkt, die ausgerichtete Spiegeloberfläche und das detektierte Sichtziel (vgl. Bothe et al. 2012a S. 1650). Da dem Fahrer die optische Kopplung der Modellkomponenten bewusst ist, kann er die Stellgrößen während einer Fahrsituation intuitiv variieren. Ihm wird durch gezielte Kopfbewegungen (vgl. Cook et al. 2011 S. 30 f.; Bothe et al. 2012a S. 1638; Zaindl et al. 2013 S. 1) der notwendigen Sichtbereich innerhalb der systembedingten Grenzen dargestellt. Bei einem Kamera-Monitor-System (KMS) ist die optische Kopplung zwischen Augpunktlage und Sichtzielpunkt unterbrochen. Eine Kopfbewegung des Fahrers hat keinen Einfluss auf das Systemverhalten. Um den Fahrern die während der Fahraufgabe benötigten Sichtbereiche auch bei einem KMS zur Verfügung zu stellen, können die situationsabhängigen Sichtbedarfe bei der Nutzung von Spiegelsystemen aufgezeichnet und fahrzeugparameterabhängig auf den Monitoren eines KMS wiedergegeben werden (vgl. Bothe et al. 2013e S. 1 ff.). Die zur ergonomischen Auslegung eines KMS notwendigen Erkenntnisse über die dynamische Sichtinteraktion sind noch zu erarbeiten.

## 1.2 Zielsetzung und Struktur der Arbeit

Aufgrund des Potentials zur Kraftstoffeinsparung und den technologiebedingten Vorteilen für den Lkw-Fahrer besteht das Interesse konventionelle Spiegelsysteme eines Nutzfahrzeugs durch Kamera-Monitor-Systeme (KMS) zu ersetzen. Das elektronische Sichtsystem wird direkt in die dynamische Sichtinteraktion zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt eingebunden und muss daher nach ergonomischen Methoden ausgelegt werden. Dazu werden Informationen zum erlernten dynamischen Sichtverhalten der Fahrer mit konventionellen Spiegelsystemen benötigt. Zum einen sind dies die vom Fahrer zur Bewältigung der fernverkehrstypischen Transportaufgabe genutzten dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht, zum anderen die dynamischen Augpunktlagen, die er während der Fahrt einnimmt. Zu beiden Forschungsfragen liegen weder Rohdaten in ausreichendem Umfang noch etablierte Analysemethoden vor. Ziel dieser Arbeit ist die auslegungsrelevanten Rohdaten zu erheben, diese anwendungsorientiert zu analysieren und exemplarisch zur ergonomischen Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) heranzuziehen (vgl. Abbildung 1-12).

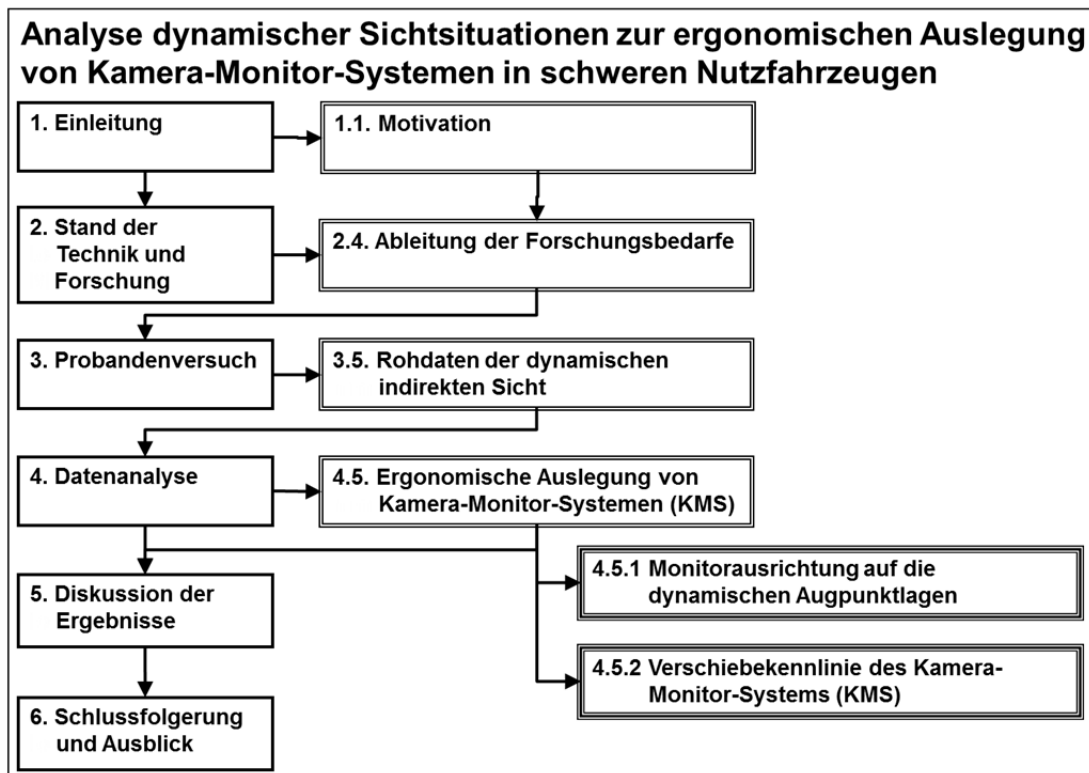


Abbildung 1-12: Struktur der Arbeit



Die in Abbildung 1-12 dargestellte Struktur der Arbeit wird im Folgenden genauer beschrieben. Kapitel 1.1 dokumentiert die Beweggründe zur ergonomischen Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS). Die in Kapitel 1.1.4 beschriebene direkte optische Kopplung zwischen Sichtziel und Augpunkt mit der der Fahrer situationsabhängig auf die für ihn notwendigen Sichtbereiche reagieren kann, liegt bei einem KMS (Kapitel 1.1.3) technologiebedingt nicht mehr vor. Ein KMS bietet für den Spediteur und den Fahrzeughersteller erhebliche wirtschaftliche Vorteile (Kapitel 1.1.2). Auch der Fahrzeugführer profitiert vom Ersatz der konventionellen Spiegelsysteme durch ein ergonomisch ausgelegtes KMS. Zur Erfüllung der in Kapitel 1.1.1 beschriebenen Transportaufgabe, ist eine situationsabhängige Verschiebung des Sichtbereichs notwendig.

In Kapitel 2 ist der Stand der Technik und Forschung zusammengestellt. Neben den ergonomischen Aspekten der Sicht aus dem Fahrzeug (Kapitel 2.1) werden die Randbedingungen der Auslegung von KMS (Kapitel 2.2) und der aktuelle Stand zur Sichtdatenerhebung (Kapitel 2.3) vorgestellt. Nach dieser Betrachtung werden die notwendigen Forschungsbedarfe abgeleitet (Kapitel 2.4).

Da Informationen über die dynamische Spiegelsicht in Nutzfahrzeugen nicht in ausreichendem Maß vorliegen, werden innerhalb eines Probandenversuchs (Kapitel 3) repräsentative Rohdaten der dynamischen indirekten Sicht erhoben (Kapitel 3.5). Ziel der Datenanalyse (Kapitel 4) ist es die empirische Grundlage zur ergonomischen Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) zu erarbeiten. Die Unterpunkte der Systemauslegung sind die Ausrichtung der Monitore des KMS auf die dynamischen Augpunktlagen aller potentieller Fahrer (Kapitel 4.5.1) und die Definition der Kennlinie zur von Fahrzeugparametern abhängigen Darstellung der vom KMS wiedergegebenen dynamischen Sichtbereiche (Kapitel 4.5.2).

Innerhalb der Diskussion der Ergebnisse werden die empirischen Erkenntnisse zusammengefasst (Kapitel 5.1), die Untersuchungsschritte kritisch reflektiert (Kapitel 5.2) und die Übertragbarkeit in eine Methode diskutiert (Kapitel 5.3). Die Arbeit schließt mit der Schlussfolgerung für Wissenschaft (Kapitel 6.1) und Praxis (Kapitel 6.2) und gibt einen Ausblick für weitere Arbeiten (Kapitel 6.3).

### 1.3 Eingrenzung des Untersuchungsinhalts

Innerhalb dieser Arbeit werden die Grundlagen zur ergonomischen Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) in schweren Nutzfahrzeugen betrachtet. Unter schweren Nutzfahrzeugen sind hierbei die schweren Sattel- und Gliederzugkombinationen für den europäischen Güterfernverkehr zu verstehen (vgl. Abbildung 1-13; Braun & Kolb 2008 S. 31 ff.; Ziegler 2008 S. 198). Wie in Kapitel 1.1.2 gezeigt wurde, sind aerodynamisch begründete Maßnahmen wie das KMS innerhalb des Nutzfahrzeugumfelds nur im Fernverkehr von Interesse (vgl. Kopp & Frank 2013 S. 653). Die Eingrenzung der Zugkombinationen wird durchgeführt, da bei den Fahrzeugen über 12 t im europäischen Fernverkehr fast ausschließlich Sattel- und Gliederzugkombinationen eingesetzt werden (Shell 2010 S. 19 f.).



Abbildung 1-13: Unterschiede in der gesetzlichen Längen- und Gewichtsbegrenzungen zwischen der EU und den USA (Ziegler 2008 S. 205)

Der weltweite Lkw-Markt teilt sich in mehrere lokale Teilmärkte, wie Europa, die USA, Südamerika, China, Japan, etc. auf. Dieser Umstand ist vornehmlich den zulassungsrelevanten Regularien der Teilmärkte geschuldet (vgl. Ziegler 2008 S. 204 ff.) und am Beispiel der unterschiedlichen Längen-

und Gewichtsbegrenzungen zwischen der EU und den USA (vgl. Abbildung 1-13) aufgezeigt. Auch die Regularien der indirekten Sicht unterscheiden sich für diese Zielmärkte (vgl. ECE-R 46/02 2009; FMVSS 111 1999). Die lokalen Vorgaben führen zu unterschiedlichen Fahrzeugkonzepten und -kombinationen, wodurch eine Eingrenzung dieser Untersuchung auf den europäischen Markt notwendig ist.

Unter Kamera-Monitor-Systemen (KMS) werden innerhalb dieser Arbeit nur neuartige Systeme zum Ersatz der Spiegelklassen II und IV (ECE-R 46/02 2009 Abs. 15.2.4.2) und nicht bereits existierende Systeme, wie das in Abbildung 1-14 dargestellte System zum Ersatz des Frontspiegels (Klasse VI), verstanden (vgl. ISO/FDIS 16505 2014 S. 1 ff.).

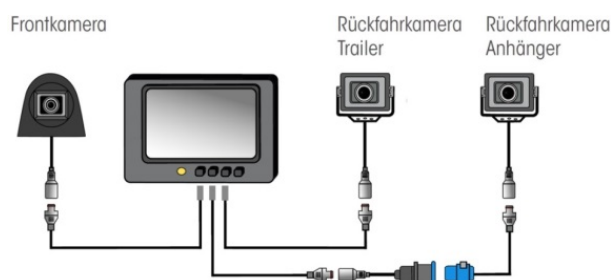


Abbildung 1-14: Kamera-Monitor-System zum Ersatz des Frontspiegels und zur Darstellung der Rückfahrkamera (Assistenzfunktion) für Sattel- oder Gliederzüge (MEKRA 2013 S. 8)

Kamera-Monitor-Systeme (KMS) nach (ISO/FDIS 16505 2014 S. 1 ff.; ECE-R 46/02 2009 Abs. 2.1.2 & 6.2.2) sind Sichtsysteme der indirekten Sicht. Daher begrenzt sich der Untersuchungsumfang dieser Arbeit auf die Sichtinteraktion der indirekten Sicht. Themen der direkten Sicht aus dem Fahrzeug werden nur zur Darstellung notwendiger Zusammenhänge behandelt. Technische Vorgaben und Messmethoden für KMS sind in ISO 16505 (ISO/FDIS 16505 2014 S. 1 ff.) beschrieben und daher nicht Gegenstand dieser Arbeit. Vielmehr werden die noch offenen Themenfelder der ergonomischen Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) beleuchtet. Dabei ist die Ausrichtung des KMS auf die dynamischen Augpunktlagen aller relevanten Fahrertypen und die Definition der Kennlinie zur von Fahrzeugparametern abhängigen Darstellung der im KMS wiedergegebenen dynamischen Sichtbereiche, der Anwendungskern dieser Arbeit.

Die Personengruppe der Lkw-Fahrer unterscheidet sich aufgrund von Merkmalen, wie der Geschlechtsverteilung der Berufsgruppe (Jürgens et al. 2000 S. 1), in den für die ergonomische Auslegung relevanten Aspekten von der Gesamtbevölkerung. Im Unterschied zum Pkw, bei dem eine gleichgewichtete Verteilung zwischen weiblichen und männlichen Kunden angesetzt wird, ist beim Lkw der Einfluss der Fahrerrinnen auf die gesamte Körperhöhenverteilung verschwindend gering (vgl. Abbildung 1-15; Jürgens et al. 2000 S. 1; Bothe et al. 2013a S. 442). Daher wird in dieser Untersuchung die Körperhöhe ausschließlich auf Erhebungen von männlichen Populationen bezogen.

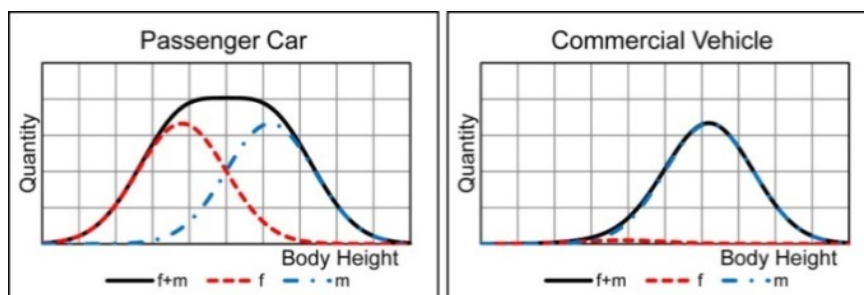


Abbildung 1-15: Einfluss der Geschlechtsverteilung von Pkw- und Lkw-Fahrern auf die Gesamtkörperhöhenverteilung (Bothe et al. 2013a S. 442)

Um die ergonomische Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) durchführen zu können, werden Daten der dynamischen Interaktion während realer Sichtsituationen erhoben. Diese Daten werden anwendungsorientiert analysiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind zur ergonomischen Gestaltung von KMS zum Ersatz konventioneller Spiegelsysteme in fernverkehrstypischen schweren Nutzfahrzeugen zu verwenden. Vor einer Anwendung der Erkenntnisse zur Auslegung von weiteren Fahrzeugsystemen oder in anderen Fahrzeugkonzepten ist die Übertragbarkeit kritisch zu prüfen.

---

## 2 Stand der Technik und Forschung

---

### 2.1 Ergonomische Aspekte der Sicht aus dem Fahrzeug

---

Zur ergonomischen Auslegung von neuen Systemkomponenten müssen diese auf die Fähigkeiten und Fertigkeiten des Menschen angepasst werden (Schlick et al. 2010 S. 969). Daher wird in diesem Kapitel zunächst der Stand der Forschung in Bezug auf die Informationsaufnahme und -verarbeitung anhand von etablierten Modellansätzen veranschaulicht. Über den visuellen Sinneskanal werden mit Abstand die meisten Informationen zur Erfüllung der Fahraufgabe aufgenommen (vgl. Abendroth & Bruder 2012 S. 6; Woyna 2013 S. 1). Die auslegungs- und untersuchungsrelevanten Eigenschaften des menschlichen Auges werden daher kurz zusammengefasst. Es folgt die Betrachtung der Sichtaufgabe und die damit verbundenen Sichteinschränkungen im Nutzfahrzeug.

---

#### 2.1.1 Informationsaufnahme und -verarbeitung

---

Das in dieser Arbeit beschriebene Kamera-Monitor-System (KMS) wird, neben den konventionellen Bedien- und Anzeigekomponenten (BAK) (vgl. Schaller 2008 S. 29; Bothe 2010b S. 38 f.), als neues Element der Mensch-Maschine-Schnittstelle eines Nutzfahrzeugs betrachtet. Die einzelnen Schritte (Stufen der Informationsverarbeitung) und sensorischen Modalitäten (Kanäle der menschlichen Wahrnehmung) zur Informationsübertragung innerhalb eines Mensch-Maschine-Systems sind in Abbildung 2-1 dargestellt (vgl. Schlick et al. 2010 S. 971).

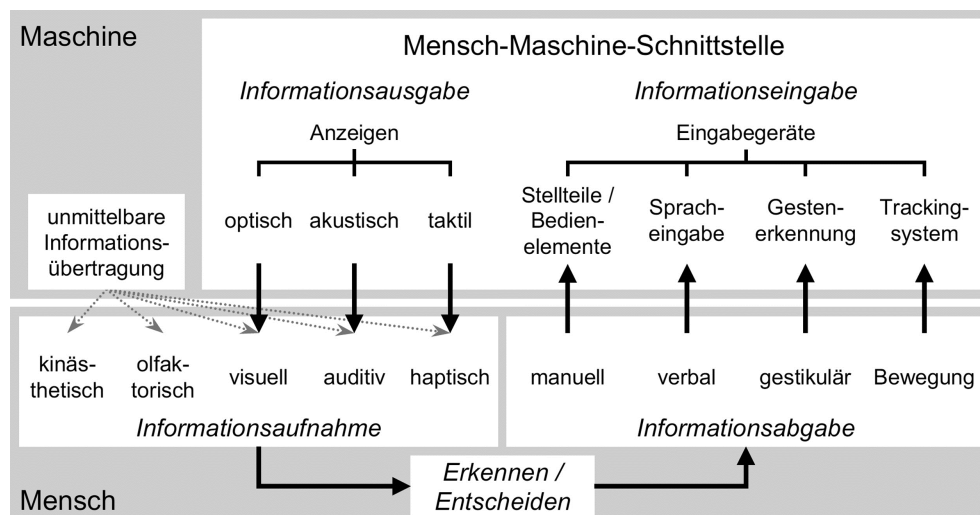


Abbildung 2-1: Informationsübertragung in Mensch-Maschine-Systemen (Schlick et al. 2010 S. 971)

Zur Beschreibung der menschlichen Informationsverarbeitung werden sequenzielle (Luczak 1975 S. 153 ff.; Rasmussen 1983 S. 258), ressourcenbasierte (Wickens & Hollands 1999 S. 10) und hybride (Abendroth & Bruder 2012 S. 4) Modellansätze herangezogen (vgl. Schlick et al. 2010 S. 286 ff.). All diesen etablierten Informationsverarbeitungsmodellen ist gemein, dass das über die Sinnesorgane des Menschen aufgenommene Signal (Stimulus) nach einer internen Verarbeitung (Kognition) in eine Reaktion (Response) umgesetzt wird (Abendroth & Bruder 2012 S. 4). Die Verarbeitungsstufen der Information können damit in die Informationsaufnahme (Perzeption), die Informationsverarbeitung (Kognition) und die Informationsabgabe (Motorik) unterteilt werden (Schlick et al. 2010 S. 969 ff.; Abendroth & Bruder 2012 S. 5 ff.). Da die zur Informationsverarbeitung verfügbaren Ressourcen begrenzt sind, können nicht alle auf den Menschen einströmenden, sondern nur gezielt ausgewählte Signale der bewussten Informationsverarbeitung zugeführt werden (James 1890 S. 402 f.; Abendroth & Bruder 2012 S. 5). Während der Informationsabgabe werden auf der Informationsverarbeitung beruhende Handlungen, im Fall der Fahraufgabe beispielsweise gezielte Bewegungen des Hand-Arm- oder des Oberkörper-Kopf-Systems, umgesetzt (Abendroth & Bruder 2012 S. 8). Durch die beschriebene Informationsverarbeitung kann eine Interaktion innerhalb des Mensch-Maschine-Systems stattfinden.

Der Mensch nimmt während der Sichtsituation im Fahrzeug die vom Kamera-Monitor-System (KMS) optisch dargestellten Informationen über den visuellen Sinneskanal auf. Daher wird im Folgenden die visuelle Information als Eingangsgröße des Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Regelkreises (vgl. Remlinger 2013 S. 47) vorrangig betrachtet. Remlinger beschreibt, in Abbildung 2-2, die primäre Fahraufgabe mit Hilfe der „Drei-Ebenen-Hierarchie“ nach Donges (vgl. Donges 1982 S. 183 ff.; Schweigert 2002 S. 5; Donges 2012 S. 16 f.; Remlinger 2013 S. 47). Innerhalb der Fahraufgabe wirken Informationen aus der Umwelt, vom Fahrzeug und aus der Reaktion des Gesamtsystems auf die Fahrerreaktion auf den Fahrer ein.

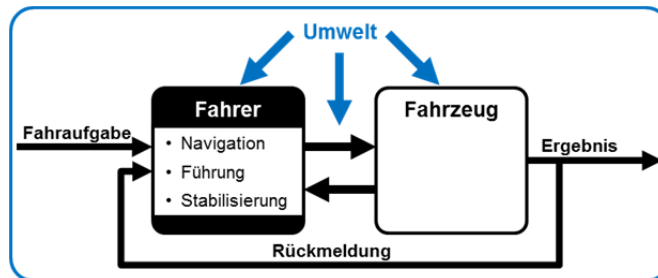


Abbildung 2-2: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt z. Erfüllung d. primären Fahraufgabe (e. D. nach Remlinger 2013 S. 47; Donges 1977; Bubb 1985 S. 265; Schweigert 2002 S. 5)

Neben den optischen Reizen, wirken auf den Fahrzeugführer auditive, haptische, kinästhetische und olfaktorische Signale (vgl. Bubb 1977 S. 103 ff.; Schweigert 2002 S. 4; Schlick et al. 2010 S. 313; Woyna 2013 S. 1). 80 bis 90% der, zur Erfüllung der Fahraufgabe notwendigen, Informationen werden jedoch visuell aufgenommen (vgl. Rockwell et al. 1968 S. 29, 1972 S. 150; Grandjean 1991 S. 230 f.; Abendroth & Bruder 2012 S. 6; Remlinger 2013 S. 21; Woyna 2013 S. 1). Das Auge ist laut Cohen (1998 S. 3), das einzige Sinnesorgan, das aus Entfernungen, jenseits des Fahrzeuganhalteweges, zielgerichtete Informationen aufnehmen kann. Durch diese Eigenschaft kann die herausragende Stellung der visuellen Informationsaufnahme während der Fahrsituation begründet werden.

### 2.1.2 Eigenschaften des menschlichen Auges

Das menschliche Auge und dessen Eigenschaften sind zur Erfüllung der Fahraufgabe von besonderer Bedeutung. Der Aufbau des Auges wird anhand der Abbildung 2-3 näher betrachtet. Das Licht fällt durch die Pupille, eine Öffnung in der Regenbogenhaut (Iris), ins Innere des Auges ein und trifft, nachdem Linse und Glaskörper passiert sind, auf die lichtempfindliche Netzhaut (Retina) auf (vgl. Schlick et al. 2010 S. 317, Krueger 1989 S. 1 f.). Die Iris hat dabei die Funktion die einfallende Lichtmenge zu begrenzen und damit das Auge auf unterschiedliche Umgebungshelligkeiten zu adaptieren. Sichtobjekte mit unterschiedlichem Abstand zum Auge werden durch die Veränderung der Linsenkrümmung auf der Retina scharf abgebildet. Diese Anpassung der Linsenbrennweite wird Akkommodation genannt. Das Akkommodationsvermögen nimmt mit zunehmendem Alter ab und führt bei häufigem Wechsel des Sichtabstandes zu Ermüdungserscheinungen (Schlick et al. 2010 S. 318).

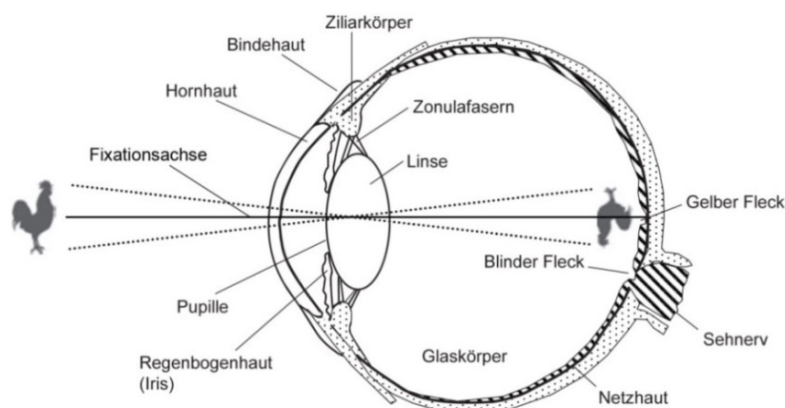


Abbildung 2-3: Aufbau des menschlichen Auges (e. D. nach Schlick et al. 2010 S. 317; Hudelmaier 2002 S. 20; Schober 1950 S. 23)



Auf der Netzhaut befinden sich zwei Arten von Photorezeptoren. Die Stäbchen sind sehr lichtempfindlich, können aber keine unterschiedlichen Farben wahrnehmen. Die Zapfen sind 500-mal weniger lichtempfindlich, sind jedoch zur Farbwahrnehmung geeignet (Schlick et al. 2010 S. 318). Die Verteilung der Stäbchen und Zapfen auf der Netzhaut ist nicht gleichmäßig sondern ortsabhängig (vgl. Abbildung 2-4). Die größte Dichte der Zapfen befindet sich im sog. „Gelben Fleck“ (fovea centralis). Die in Abbildung 2-3 dargestellte Fixationsachse (vgl. Hudelmaier 2002 S. 20) verläuft vom Sichtobjekt durch die Mitte der Pupille zum Gelben Fleck. Der Austritt des Sehnervs ist nicht lichtempfindlich und wird als „Blinder Fleck“ (vgl. Abbildung 2-4) bezeichnet.

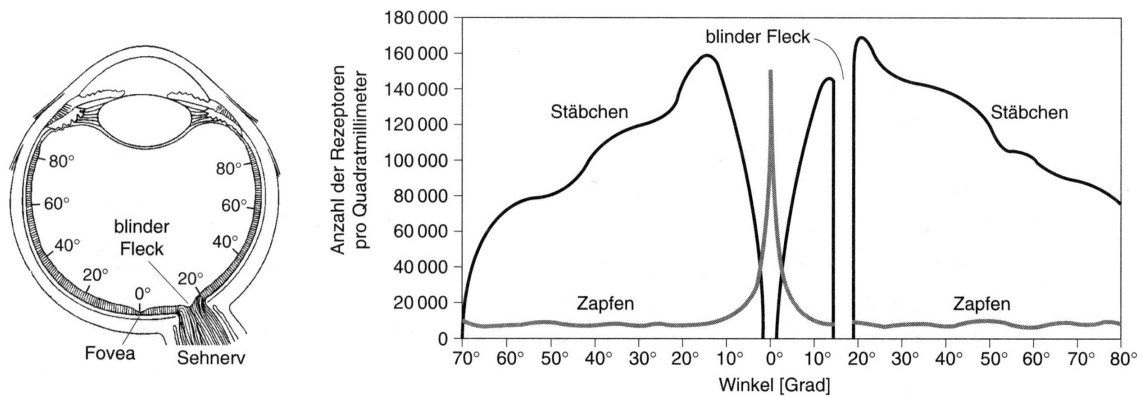


Abbildung 2-4: Verteilung von Stäbchen und Zapfen über die Netzhaut (Becker-Carus 2004 S. 104)

Die Verteilung der lichtempfindlichen Photorezeptoren definiert auch den Bereich des Gesichtsfelds. Es beschreibt den Sichtbereich innerhalb dessen bei ruhenden Augen Informationen aus der Umgebung aufgenommen werden können (vgl. Schlick et al. 2010 S. 323). In Abbildung 2-5 ist das Gesichtsfeld für unbunte Reize (vgl. Schober 1950 S. 95 ff.) für das rechte und das linke Auge dargestellt. Da sich die beiden Felder nur teilweise überschneiden, kann nur der mittlere Bereich des Gesamtgesichtsfeldes mit beiden Augen (binokular) gesehen werden. Die linken und rechten Randbereiche werden nur mit jeweils einem Auge (monokular) eingesehen (vgl. Kandel et al. 1996 S. 373 ff.).

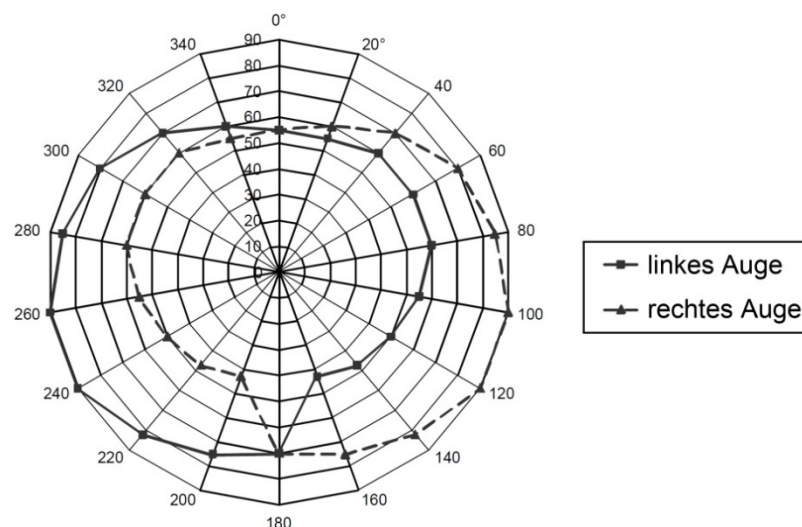


Abbildung 2-5: Gesichtsfeld für unbunte Reize (nach Schober 1950 S. 96)

Abhängig von der Dichte und Anordnung der Stäbchen bzw. Zapfen haben auch die unterschiedlichen Bereiche des Gesichtsfelds differente Eigenschaften. Die Sehschärfe ( $V$ ), definiert als Kehrwert des kleinsten noch auflösenden Sichtfeldwinkels ( $\alpha$ ) (vgl. Schmidtke 1989 S. 1; Schlick et al. 2010 S. 324), liegt im zur Entfernungseinschätzung notwendigen Maße nur im Bereich der fovea centralis vor. Dieser in Abbildung 2-6 dargestellte Bereich nimmt einen Sichtfeldwinkel von ca.  $1^\circ$  um die Fixationsachse ein (vgl. Krueger 1989 S. 4 f.; Hudelmaier 2002 S. 20; Pannasch 2003 S. 3; Schweigert 2002 S. 5; Remlinger 2013 S. 25). Daher wird die Fixationsachse stets auf das Sichtobjekt ausgerichtet (Partmann et al. 1996 S. 7). Die foveale Sicht ist somit eine wichtige Messgröße der Informationsaufnahme während der Fahrzeugführung (Cohen & Zwahlen 1989 S. 1).

Auch die Fähigkeit zur Wahrnehmung von Buntreizen ist von der Position innerhalb des Gesichtsfelds abhängig (Krueger 1989 S. 10; Hudelmaier 2002 S. 21). In Abbildung 2-6 sind am Beispiel des linken Auges, zusätzlich zum Gesichtsfeld für unbunte Reize, die Außengrenzen der Wahrnehmung von grünen, roten und blauen Lichtsignalen, aufgezeigt. Für das rechte Auge sind die Begrenzungslinien der Detektion von Signalen mit unterschiedlicher Leuchtdichte (vgl. Schlick et al. 2010 S. 325 f.) markiert.

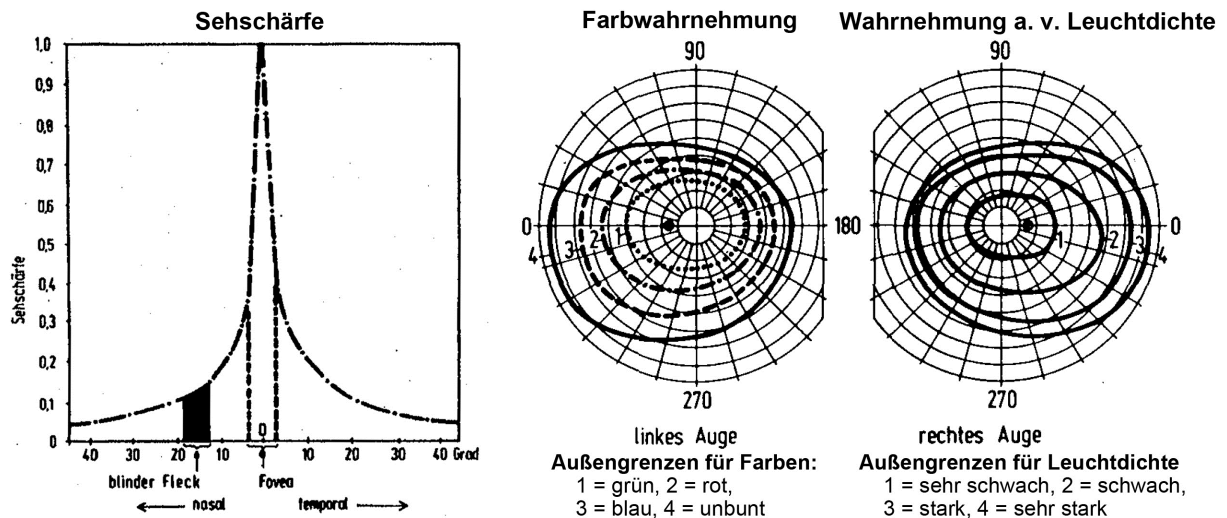


Abbildung 2-6: Abhängigkeit der Sehschärfe, der Farbwahrnehmung und der Wahrnehmung von Signalen mit unterschiedlicher Leuchtdichte von der Position innerhalb des Gesichtsfeldes (e. D. nach Schober 1950 S. 97 ff.; Schober 1954 143 ff.; Krueger 1989 S. 10)

Ist das Auge über die Fixationsachse auf ein sich ggf. bewegendes Sichtobjekt ausgerichtet, spricht man von einer Fixation. Das Auge befindet sich bezogen auf das Blickobjekt in relativer Ruhe (vgl. Pannasch 2003 S. 3), wobei zur Aufrechterhaltung der Bildschärfe Mikrobewegungen des Auges durchgeführt werden (Yarbus 1967 S. 107 ff.). Der Wechsel zu einem neuen Sichtobjekt erfolgt mit einer schnellen ballistischen Bewegung (Sakkade). Diese Bewegungen finden mit einer Geschwindigkeit von bis zu 900°/s, durchschnittlich dreimal in der Sekunde statt (Pannasch 2003 S. 3; Partmann et al. 1996 S. 8). Die Dauer einer sakkadischen Blickbewegung kann auf 20 bis 80 ms (Krueger 1989 S. 8) beziffert werden. Während eines solchen Blicksprunges werden keine visuellen Informationen verarbeitet (Hoffman 1998 S. 120). Die Fixationsdauer während der Fahraufgabe beträgt durchschnittlich 300 bis 400 ms (vgl. Karsh & Breitenbach 1983 S. 53 ff.; Schweigert 2002 S. 84 ff.) und kann damit eindeutig von den Sakkaden differenziert werden.

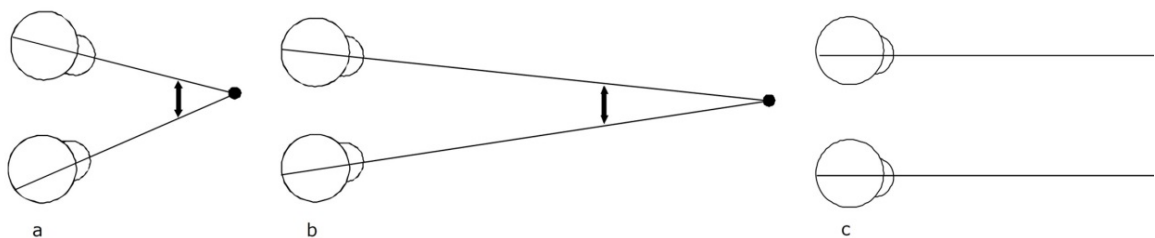


Abbildung 2-7: Fixation auf (a) nahe, (b) mittlere und (c) weit entfernte Sichtziele (n. Engelkamp & Zimmer 2006)

Fixationen können über ihre Dauer separiert und untereinander verglichen werden (vgl. Partmann et al. 1996 S. 8). Über die Ausrichtung der Fixationsachsen, des linken und rechten Auges, lassen sich die Entfernung der angeblickten Sichtziele bestimmen und die dafür notwendige Akkommodation (vgl. Abbildung 2-7) ableiten. Durch den Schnitt der Fixationsachse mit einer bekannten Sichtzielfläche (AOI) kann der exakte Sichtzielpunkt (GIP) berechnet werden. Die periphere Sicht eignet sich nicht zur Beschreibung der gerichteten Informationsaufnahme (Schweigert 2002 S. 5). Aufgrund der verminderten Sehschärfe und Farbwahrnehmung werden Objekte im peripheren Bereich lediglich detektiert (vgl. Schober 1954; Krueger 1989 S. 10). Um aussagekräftige Informationen über die dynamische Sichtinteraktion zur Erfüllung der Fahraufgabe ableiten zu können, eignet sich somit die Erfassung dynamischer Augpunktlagen und Sichtstrahlorientierungen während der Sichtzielfixation.

### 2.1.3 Sichtaufgabe und Sichteinschränkung im Nutzfahrzeug

Die Sichtaufgabe im Nutzfahrzeug wird von der in Kapitel 1.1.1 beschriebenen Transportaufgabe abgeleitet. Aus dem Nutzfahrzeug werden, unter Berücksichtigung der konzeptbedingten Augpunktlage und der daraus resultierenden Sichteinschränkung, die anderen Verkehrsteilnehmer, die Verkehrsinfrastruktur und das Verhalten des eigenen Fahrzeugs innerhalb der Fahraufgabe (vgl. Donges 1982 S. 183 ff; Schweigert 2002 S. 18) zur Ableitung von Fahrerreaktionen (vgl. Abendroth & Bruder 2012 S. 4) überwacht.

In Abbildung 2-8 ist das Zusammenspiel zwischen direkter (1) und indirekter Sicht (3 bis 6) aus einer Sattelzugmaschine (7) aufgezeigt (vgl. ISO/FDIS 16505 2014 S. 93). Die Sichtbereiche 3 bis 6 repräsentieren hierbei die gesetzlich geforderten Sichtfelder (ECE-R 46/02 2009 Abs. 15.2.4.2). Die Fahrzeughersteller decken zur Erfüllung von Kundenanforderungen jedoch größere Sichtbereiche der indirekten Sicht ab (vgl. Fornell-Fagerström & Gardlund 2012 Appendix D). Trotz dieser Sichtfeldabdeckung treten große Bereiche, die weder über die direkte noch die indirekte Sicht eingesehen werden können, im Umfeld der Fahrerkabine auf. Die sog. „Blind Spots“ (2) (vgl. Tait & Southall 1998 S. 20; Cook et al. 2010 S. 91 ff.) werden durch Sichteinschränkungen, die im Folgenden genauer betrachtet werden, hervorgerufen. Das dargestellte Nutzfahrzeug besteht neben der Sattelzugmaschine aus dem Auflieger (8), der abhängig von der Fahrsituation unter einem Knickwinkel relativ zum Zugfahrzeug ausgerichtet ist. Mögliche Aufliegerpositionen (9) mit großen Knickwinkeln, die typischerweise bei Abbiege- oder Rangiermanövern auftreten (Bothe et al. 2013b S. 298 ff.; Zaindl et al. 2013 S. 2), sind ebenfalls dargestellt (vgl. ISO/FDIS 16505 2014 S. 93) und müssen bei der ergonomischen Auslegung der indirekten Sicht berücksichtigt werden.

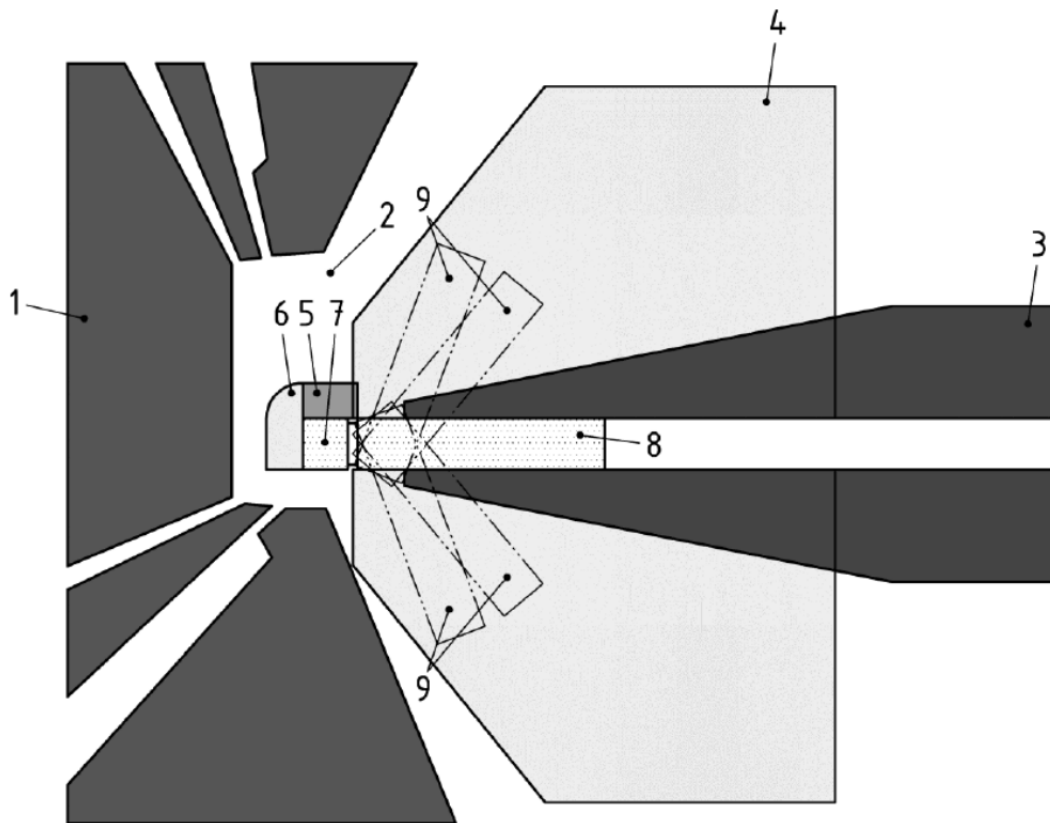


Abbildung 2-8: Zusammenspiel von direkter und indirekter Sicht im Nutzfahrzeug; Sichtbereiche auf Fahrbahnniveau (ISO/FDIS 16505 2014 S. 93)

Die innerhalb der Sichtaufgabe verfügbaren visuellen Informationen werden bereits durch die Einschränkungen während der Informationsaufnahme, durch das menschliche Auge (vgl. Kapitel 2.1.1 und 2.1.2) und die Grenzen fahrerinitiiertter Kompensationsbewegungen (vgl. Hudelmaier 2002 S. 21 f.), reduziert. Auch das Fahrzeug stellt durch seine Sichtverdeckungen einen Informationsfilter dar (Woyna et al. 2010 S. 1). Bauartbedingt ist bei einer Fernverkehrssattelzugkombination die direkte Sicht stark eingeschränkt (vgl. Kapitel 1.1.1).

Die gesetzlich vorgeschriebenen Sichtfelder (3 bis 6) (vgl. ECE-R 46/02 2009 Abs. 15.2.4.2) werden mit Hilfe der sechs am Fahrzeug montierten Außenspiegel (vgl. Abbildung 2-9) abgedeckt. Dies sind die fahrer- und beifahrerseitigen Hauptspiegel (Klasse II) und Weitwinkelspiegel (Klasse IV), sowie der Rampenspiegel (Klasse V) und der Frontspiegel (Klasse VI). Allein schon die im Vergleich zum Pkw hohe Anzahl der notwendigen Spiegel unterstreicht das Gewicht der indirekten Sicht aus dem Nutzfahrzeug. Zur Überwachung der relevanten Fahrzeugumgebung muss der Fahrer mehrere getrennt voneinander angeordnete Spiegelsichtziele betrachten und innerhalb eines gesamtheitlichen mentalen Modells (vgl. Hakuli et al. 2012 S. 641) der Fahrzeugumgebung bewerten.

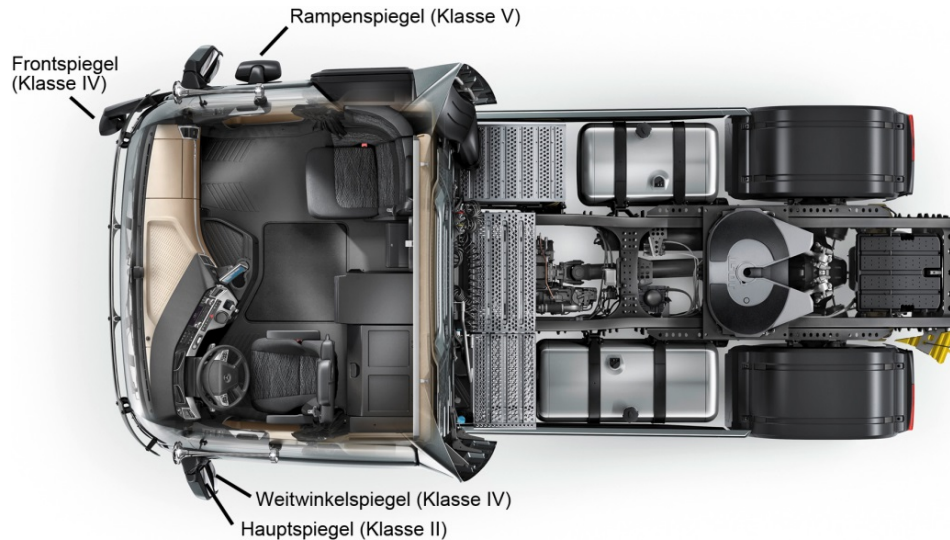


Abbildung 2-9: Spiegelanordnung an einer Sattelzugmaschine (e. D. n. Daimler 2014)

Durch die optische Kopplung zwischen Augpunktlage, Spiegelfläche und Sichtziel (vgl. Cook et al. 2011 S. 30 f.; Bothe et al. 2013b S. 298 ff.), müssen die Spiegel so am Fahrzeug befestigt sein, dass sie vom Fahrerplatz aus einsehbar sind und dem Fahrer die relevanten Sichtbereiche darstellen. Damit geht eine weitere Reduktion der für die direkte Sicht zur Verfügung stehenden Bereiche der Karosserieöffnungen einher. Damit führen die Spiegel zur Verschlechterung der direkten Sicht (vgl. Cook et al. 2011 S. 39; Abbildung 2-8). Danielsson (2011 S. 42) kann durch eine Probandenbefragung die Außenspiegel einer Sattelzugmaschine als wichtigste sichtverdeckende Bauteile des Fahrzeugs identifizieren (vgl. Abbildung 2-10). Innerhalb der Studie wurden Lkw-Fahrer nach den Karosserie- oder Anbauteilen, die die Sicht aus der Fahrzeugkabine behindern gefragt.

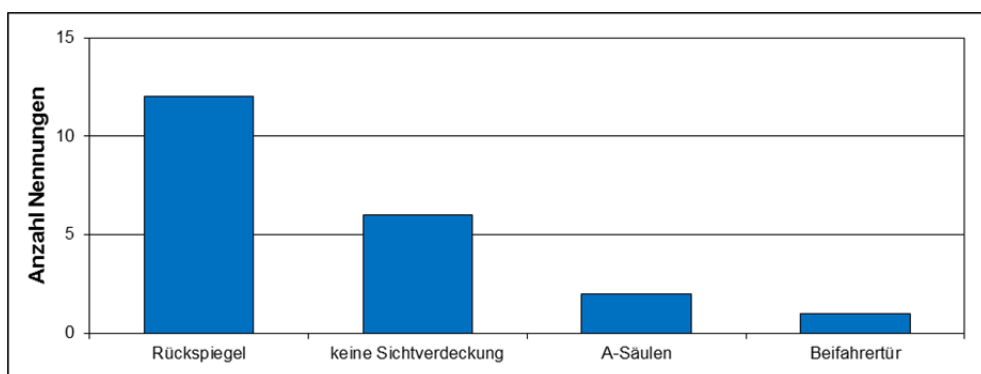


Abbildung 2-10: Sichtverdeckungen der direkten Sicht durch Karosserie- oder Anbauteile an einer Sattelzugmaschine (e. D. nach Danielsson 2011 S. 42)

In Abbildung 2-11 werden die durch Außenspiegel und A-Säule hervorgerufenen Sichtverdeckungen während dynamischer Sichtsituationen aus dem Blickwinkel des Fahrers dargestellt (vgl. ISO/FDIS 16505 2014 S. 126 ff.). Im linken Bild verdeckt der linke Hauptspiegel die vorausliegende Verkehrssituation innerhalb einer Kreisverkehrsdurchfahrt. Durch den großen Knickwinkel zwischen Zugmaschine und Auflieger blockiert der Anhänger die indirekte Sicht auf die zurückliegende Verkehrssituation. Die Einhaltung der vorgegebenen Fahrspur des Aufliegers kann aus dieser Augpunktlage nicht kontrolliert werden, da die Position der hinteren Anhängerachse, in Bezug auf die



Fahrbahnmarkierungen im Spiegel nicht dargestellt wird. Im rechten Bild ist die Sichtverdeckung durch die beifahrerseitigen Haupt- und Weitwinkelspiegel in einer Kreuzungssituation visualisiert. Der durch die hohe Anordnung der Kabine hervorgerufene große „Blind Spot“ (vgl. Abbildung 2-8) wird durch die Spiegel-Säulen-Kombination noch erweitert. Damit kann das Verhalten anderer Kraftfahrzeuge, die sich in diesem Bereich aufhalten, schwer eingeschätzt werden. Kleinere Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger, Rad- oder Motorradfahrer, werden durch diese Sichtverdeckung sogar komplett übersehen (vgl. Cook et al. 2010 S. 91 ff.; Cook et al. 2011 S. 41).

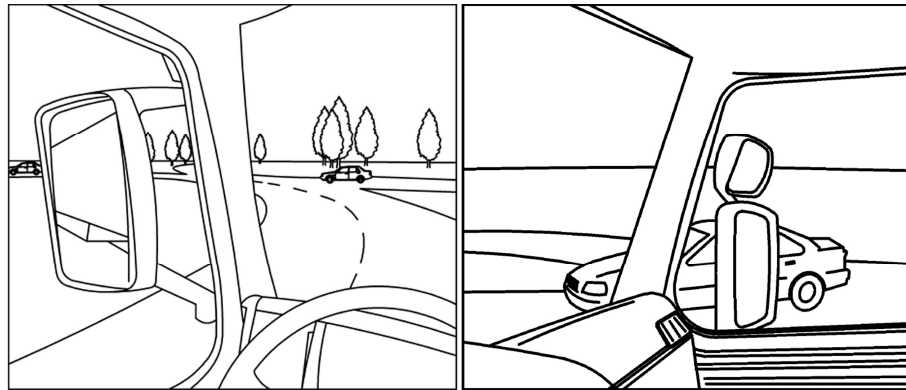


Abbildung 2-11: Sichtverdeckung während Kreisverkehrsdurchfahrt (links) und in Kreuzungssituation (rechts) (nach ISO/FDIS 16505 2014 S. 126; S. 132)

Zur systematischen Bewertung von Sichtverdeckungen müssen die Verdeckungsbereiche abhängig von den Auswirkungen der jeweiligen Verdeckung auf die Erfüllung der Fahraufgabe priorisiert werden (vgl. Scholly 2006 S. 13 ff.; Woyna 2013 S. 74 ff.). Danielsson schlägt die in Abbildung 2-12 dargestellte relative Gewichtung der Sichtsektoren für mittelschwere und schwere Nutzfahrzeuge vor (vgl. Danielsson 2011 S. 59). Die Gewichtungsskala geht von 1 bis 5, wobei die Sichtzonen mit hoher Priorität zur Erfüllung der Fahraufgabe mit niedrigen Zahlenwerten beschrieben werden. Durch die nutzungsorientiert gewichtete Bewertung kann die Position und die Form von notwendigen sichtverdeckenden Bauteilen ergonomisch optimiert werden. Die Haupt- und Weitwinkelspiegel liegen in hoch priorisierten Sichtgebieten.

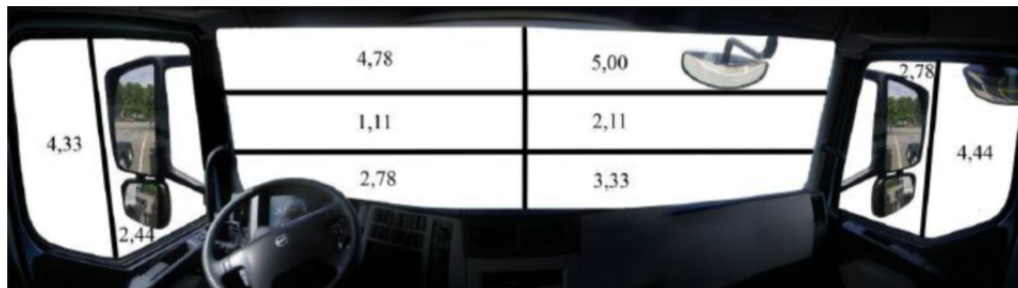


Abbildung 2-12: Relative Gewichtung unterschiedlicher Sichtzonen der direkten Sicht in Volvo FM/FH-Trucks (Danielsson 2011 S. 59)

Wie in Abbildung 2-8 und Abbildung 2-11 dargestellt, ist der Auflieger einer Sattelzugmaschine bei Sichtsituationen mit hohen Knickwinkeln sowohl Sichtziel als auch Sichthindernis der indirekten Sicht (vgl. Kapitel 1.1.4; Bothe et al. 2012a S. 1638; Zaindl et al. 2013 S. 1). Die Spiegelsicht wird zusätzlich durch die Begrenzung der Spiegelfläche, die Spiegelkrümmung und die limitierten Verortungsmöglichkeiten eingeschränkt. Auch die vom Fahrer durchgeführten Kompensationsbewegungen (Hudelmaier 2002 S. 21 ff.) zur Verbesserung der direkten und indirekten Sicht sind aufgrund des menschlichen Bewegungsapparats und der Anforderungen zur Erfüllung der dynamischen Fahraufgabe begrenzt.

Es kann festgehalten werden, dass die Sichtaufgabe im Nutzfahrzeugumfeld insbesondere in komplexen Fahrsituationen mit großen Knickwinkeln dynamisch betrachtet werden muss (Bothe et al. 2012c S. 2 ff.). Die Außenspiegel sind zur Darstellung der indirekten Sicht notwendig, blockieren aber die direkte Sicht. Der Auflieger eines Sattelzugs nimmt unter den Sichteinschränkungen eine Ausnahmerolle ein. Er ist ein vom Knickwinkel zwischen Zugmaschine und Auflieger abhängiges dynamisches Sichtziel und zugleich Sichthindernis der indirekten Sicht.

## 2.2 Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS)

Ein Kamera-Monitor-System (KMS) zum Ersatz von Fahrzeugspiegeln der Klassen I bis IV (ECE-R 46/02 2009 Abs. 15.2.4.2) besteht nach ISO 16505 aus den in Abbildung 2-13 dargestellten Systemkomponenten (ISO/FDIS 16505 2014 S. 22). Im Einzelnen sind das eine Einrichtung zur Bilderfassung (Kamera), ein Modul zur Signalverarbeitung (Steuergerät) und eine Einheit zur Bilddarstellung (Monitor). Das Gesamtsystem hat somit mindestens zwei optische Schnittstellen. Die Kamera erfasst die relevanten Sichtbereiche der Umgebung und der Monitor stellt die verarbeiteten Bildinformationen dem Fahrer dar. Da die Sicht zur Erfüllung der Fahraufgabe von größter Bedeutung ist (vgl. Kapitel 2.1.3), muss ein Kamera-Monitor-System (KMS), das die relevanten Informationen der indirekten Sicht zur Verfügung stellen soll, neben den technischen Kennwerten auch nach ergonomischen Gesichtspunkten ausgelegt werden.

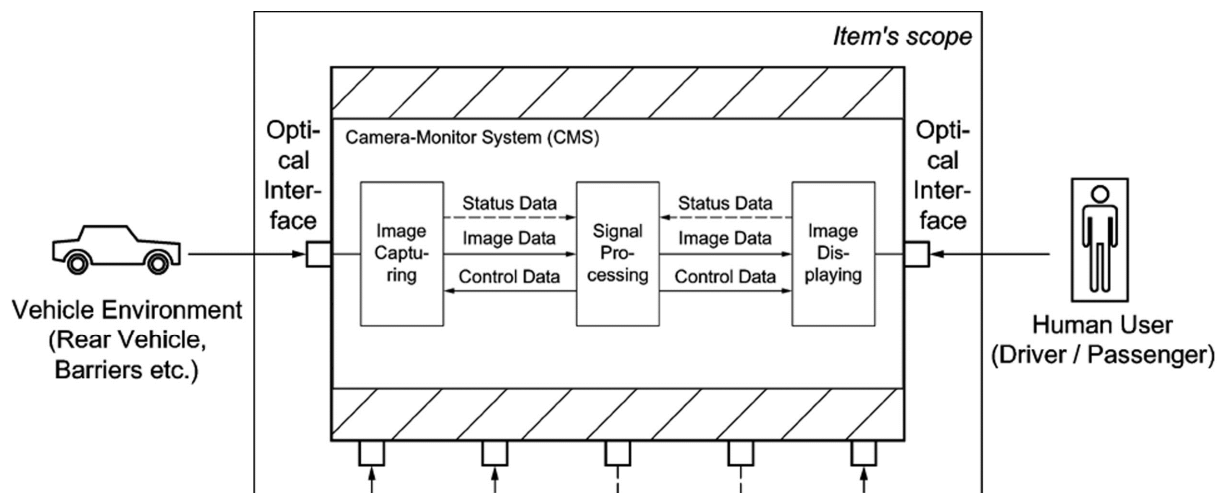


Abbildung 2-13: Systemkomponenten eines Kamera-Monitor-Systems (e. D. nach ISO/FDIS 16505 2014 S. 21 f.)

Spiegelsysteme wurden im Laufe der letzten Jahrzehnte durch geänderte und erweiterte Regularien (vgl. ECE-R 46/01 2005 Annex 6; ECE-R 46/02 2009 Abs. 1.5.2.4) und ergonomische Weiterentwicklungen durch die Systemlieferanten und Fahrzeughersteller an die Anforderungen der sich verändernden Transportaufgabe (vgl. Kapitel 1.1.1) angepasst. Die aktuellen Spiegelsysteme bilden somit die Referenz für die Entwicklung von neuartigen elektronischen Sichtsystemen wie dem KMS (vgl. ISO/FDIS 16505 2014 Scope).

In Kapitel 2.2.1 werden zunächst der ergonomische Absicherungsprozess und die Werkzeuge zur Bewertung und Dokumentation der einzelnen Auslegungsschritte eines Fahrzeugs vorgestellt. Im folgenden Kapitel werden innerhalb einer Gegenüberstellung ausgewählter Eigenschaften von konventionellen Spiegelsystemen und Kamera-Monitor-Systemen (KMS) die technologiebedingten neuen Auslegungsparameter eines KMS beleuchtet. Da im Nutzfahrzeugumfeld noch kein vorgestelltes Kamera-Monitor-System (KMS) zum Ersatz der Haupt- (Klasse II) und Weitwinkelspiegel (Klasse IV) (ISO/FDIS 16505 2014 S. 22) existiert, werden als Grundlage zur weiteren ergonomischen Auslegung eines KMS die konzeptionellen Randbedingungen des in dieser Arbeit untersuchten KMS festgelegt. Es werden die Positionierung und Ausrichtung der Kamera- und Monitorkomponenten definiert und visualisiert. Die Parameter zur Darstellung des auf der notwendigen Darstellungsfläche des Monitors angezeigten Sichtbereichs können für Standardsituationen ebenfalls festgelegt werden.

Es bleiben Parameter, die mit den beschriebenen Auslegungsmethoden nicht bearbeitet werden können offen. So ist die Erfüllung des Anspruches nach einer Monitordarstellung in der geforderten Bildqualität durch die Ausrichtung der Monitore auf den Auslegungsaupunkt (ORP) nicht hinreichend belegt. Es werden zusätzliche Informationen über die monitorbezogene Verortung der relevanten dynamischen Augpunktlagen benötigt. Auch über die vom Fahrer in dynamischen Sichtsituationen genutzten Bereiche der indirekten Sicht liegen keine ausreichenden Erkenntnisse vor. Die Grundlagen und Stellgrößen zur Untersuchung der noch offenen Punkte werden in den abschließenden Kapiteln detailliert behandelt.

### 2.2.1 Ergonomischer Absicherungsprozess

Zur ergonomischen Auslegung von neuen Fahrzeugen und Fahrzeugkomponenten müssen auch diese auf die Fähigkeiten und Fertigkeiten des Menschen angepasst werden (vgl. Schlick et al. 2010 S. 969). Zu Beginn der Ergonomieabsicherung neuer Fahrzeugkonzepte werden dazu innerhalb der Strategiewphase die Kunden-Nutzen-Kriterien und die damit verbundenen Ergonomieziele definiert (Meilenstein 1 in Abbildung 2-14) (vgl. Wagner 2007 S. 3; Meurle et al. 2009 S. 9 f.; Bothe 2010b S. 30 f.). Für die damit verbundene ergonomische Grundausslegung der Maßkonzeption (Müller 2010 S. 1 f.) und zur Bestätigung der Fahrzeugproportionen (Wagner 2007 S. 4 f.) werden bereits in dieser frühen Projektphase die Sitzhaltungen und Augpunktlagen des definierten Nutzerportfolios benötigt (Schaller 2008 S. 5; Bothe 2010b S. 78 ff.).

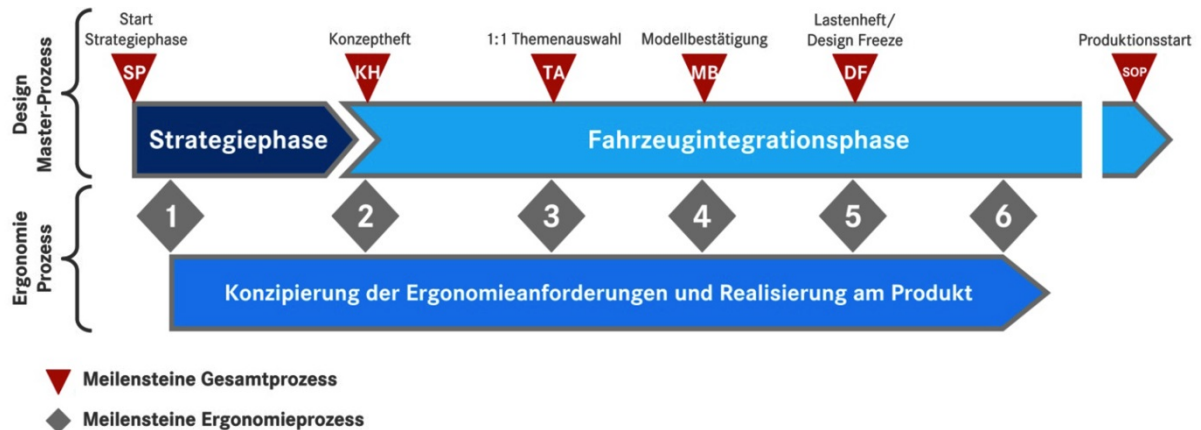


Abbildung 2-14: Meilensteine des ergonomischen Absicherungsprozess (Bothe 2010b S. 30)

Eine Datengrundlage kann mit Hilfe von Probandenversuchen in parametrisierbaren Sitzkisten (vgl. Scholly 2006 S. 19; Bothe 2010b S. 19; Fröhmel 2010 S. 49), in vollvirtuellen Fahrsimulatoren, wie der VR-Umgebung CAVE (vgl. Scholly 2006 S. 16; Bothe 2010b S. 23) oder im realen Fahrversuch (vgl. Scholly 2006 S. 6; Woyna 2013 S. 53 ff.; Zaindl et al. 2013 S. 5) erhoben werden. Aufgrund der frühen Projektphase liegen die für derartige Untersuchungen benötigten Oberflächen- und Packaging-Daten, sowie die seriennahen Technikkomponenten, noch nicht in ausreichendem Maße vor. Daher hat sich für diesen Prozessschritt, neben den bewährten aber begrenzt aussagekräftigen Werkzeugen der Maßkonzeption, wie den Körperumrisschablonen (DIN 33408-1 2008) oder den SAE-Augellipsoiden (SAE J941 2010), die menschenmodellbasierte Simulation von Sitzhaltungen auf Grundlage der an das neue Fahrzeugkonzept adaptierten Erkenntnisse aus vorangegangenen Auslegungen etabliert (Seidl 1994 S.1 ff.; Seidl 1997 S. 1; Schaller 2008 S. 4; Wagner 2007 S. 2; Human Solutions 2013 S. 11 ff.). Sowohl zur Durchführung (Reed et al. 2000a S. 7 ff.) als auch zur Validierung (Fröhmel 2010 S. 119 ff.) modellbasierter Haltungssimulationen werden repräsentative Augpunktlagenverteilungen benötigt.

Im weiteren Verlauf der Konzeptentwicklung werden die technik- und designgetriebenen Randbedingungen zunehmend konkretisiert und die Maßkonzeption dadurch geschärft (Wagner 2007 S. 6 f.; Meurle et al. 2009 S. 10 ff.; Bothe 2010b S. 30 ff.). Die ergonomische Absicherung zu den Meilensteinen 3 ff. basiert damit auf einer optimierten Datengrundlage und nimmt, wie das gesamte Projekt, in Umfang und Komplexität zu. Neben der Simulation der realitätsnahen Fahrhaltung gewinnen Themen, wie die Umsetzung und Absicherung der intuitiven Bedienung und der gesamtheitlichen Sichtbeurteilung, an Gewicht. Es werden Informationen über die dem Nutzungskontext zugeordneten Augpunktlagen in Verbindung mit den Sichtstrahlausrichtungen (Seidl 1994 S. 92 ff.; Bothe 2010b S. 80 ff.) und dem dynamischen Blickverhalten (Scholly 2006 S. 6 ff.) der Fahrzeuginsassen benötigt. Spätestens zur Ergonomiefreigabe (Meilenstein 6) werden die ergonomischen Sichtparameter am Prototypenfahrzeug abgesichert (Bothe 2010b S. 30) und es kann die Simulationsqualität der vorausgegangenen Bewertungsschritte überprüft werden. Nach der Serieneinführung des neuen Fahrzeugs können im realen Fahrbetrieb umfangreiche Sichtdatensätze als Grundlage für die Erstausslegung des Nachfolgefahrzeugs und für die erfahrungsbasierte Methodenentwicklung erhoben werden. Durch die systematische ergonomische Auslegung und gezielte Bewertung über mehrere Produktentwicklungszyklen hinweg wird eine Wissensbasis über die prozessabhängige Anpassung der Konzeptdaten und die finale Umsetzung von Auslegungselementen im Serienfahrzeug aufgebaut.

Zur Steuerung und Dokumentation der Ergonomieabsicherung werden Prüflisten (vgl. Schaller 2008 S. 20) wie der Ergonomiepass (Bothe 2010b S. 32; Zink 2013 S. 63), der im Folgenden näher beschrieben wird eingesetzt. Der Ergonomiepass ist aufgrund der verschiedenen Einsatzszenarien, von der direkten Bewertung während eines Expertenversuchs bis zur verdichteten Präsentation der Gesamtergebnisse auf Topmanagementebene (Bothe 2010b S. 32) und der besseren Strukturierung der einzelnen Prüfkriterien, in mehreren Ebenen (vgl. Abbildung 2-15) aufgebaut. Damit ist eine Anpassung auf den jeweils notwendigen Detaillierungsgrad durch die Auswahl der entsprechenden Darstellungsebene möglich.

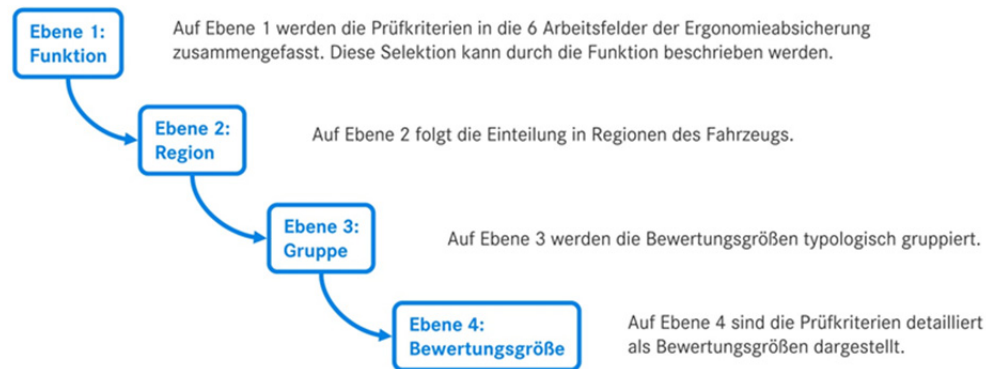


Abbildung 2-15: Ebenenstruktur des Ergonomiepasses (Bothe 2010b S. 32)

Auf Ebene 1 werden die Unterpunkte in die Hauptarbeitsfelder der Ergonomieabsicherung (vgl. Schaller 2008 S. 20) wie das Sitzen, der Ein-/Ausstieg, das Raumgefühl, die Sicht, etc. (Bothe 2010b S. 32) gruppiert. Auf den tieferen Ebenen können mit zunehmendem Detaillierungsgrad ebenfalls Einteilungen der Einzelpunkte vorgenommen werden. Die Prüfkriterien sind auf Ebene 4 durch die ergonomischen Bewertungsgrößen repräsentiert. Die Umsetzung des Ergonomiepasses als mehrdimensionale Prüfliste (vgl. Bothe 2010b S. 32 ff.) ist in Abbildung 2-16 dargestellt.

1	2	3	4	A	B	C	D	E	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	1_Sitzen			Ergonomiepass										in Ordnung (io)	1		
2	2_Einstieg / Ausstieg			nio, Maßnahmen definiert oder Mangel akzeptiert											2		
3	3_Raumgefühl			TA: Themenauswahl A, B, C: Modell A, B, C nicht in Ordnung (nio)											3		
4	4_Sicht			Vorg. Vorgängerfahrzeug MB: Modellbestätigung nicht geprüft											0		
5	5_Bedenbarkeit			DF: Design Freeze EF: Ergonomie-Freigabe keine Bewertung möglich											X		
6	6_Beladung																
7																	
8	1 Funktion	2 Region	3 Gruppe	4 Bewertungsgröße	Prio	DE-rel.	Kommentar	Vorg.	TA A	TA B	TA C	MB	DF	EF			
9																	
10	1_Sitzen	1_0_Gesamt			1				2	3	3	3	3	2	1		
11	1_Sitzen	1_1_Fahrer	1_1_0_Gesamt		1				2	3	3	3	3	2	1		
12	1_Sitzen	1_1_Fahrer	1_1_1_Abstützung	Gesamt	1				2	3	3	3	2	2	1		
13	1_Sitzen	1_1_Fahrer	1_1_1_Abstützung	Armauflage Miko (Breite, Höhe, Lage, Länge, Neigung)	1	int	CAD-Modell		1	1	1	1	2	1	1		
14	1_Sitzen	1_1_Fahrer	1_1_1_Abstützung	Armauflage Tür (Breite, Höhe, Lage, Länge, Neigung)	1	int	CAD-Modell		2	3	3	3	2	2	1		

Abbildung 2-16: Umsetzung des Ergonomiepasses als mehrdimensionale Prüfliste (Bothe 2010b S. 33)

Die Bewertung wird mittels einer dreistufigen Skala, von „in Ordnung (io)“ bis „nicht in Ordnung (nio)“ zu jedem Entwicklungsschritt dokumentiert. Wird ein Kriterium nicht geprüft oder ist aufgrund des Entwicklungsstandes noch keine Bewertung möglich wird diese Information ebenfalls festgehalten. Die Prüfzeitpunkte sind am ergonomischen Absicherungsprozess (vgl. Abbildung 2-14) orientiert und schließen auch die Beurteilung des Vorgängerfahrzeugs mit ein. Die Bewertungsergebnisse der unteren Ebenen werden automatisiert zu Bewertungen der oberen Ebenen verarbeitet. Zur Priorisierung und Kennzeichnung der Designrelevanz stehen ebenfalls Auswahlfenster zur Verfügung. Das geeignete Bewertungswerkzeug (vgl. Bothe 2010b S. 27 f.) zur Absicherung der einzelnen Bewertungsgrößen wird im Ergonomiepass definiert und dokumentiert.



Die Bewertung der Sichtthemen (vgl. Hudelmaier 2002 S. 10; Scholly 2006 S. 4; Remlinger 2013 S. 21; Woyna 2013 S. 7; etc.) nimmt während der ergonomischen Absicherung (vgl. Schaller 2008 S. 20, Bothe 2010b S. 30) eine wichtige Rolle ein (Bothe 2010b S. 37). In Abbildung 2-17 ist eine Auswahl der Prüfkriterien zur Sichtbewertung dargestellt. Bei konventionellen Fahrzeugkonzepten kann zwischen der direkten Sicht aus dem Fahrzeug, der indirekten Sicht über Spiegelsysteme und der Sicht auf Anzeigen unterschieden werden (vgl. Remlinger 2013 S. 64; Woyna 2013 S. 14). Für einen Pkw wird innerhalb der indirekten Sicht, zwischen der Sicht über Innenspiegel und der Sicht über Außenspiegel differenziert. Bei einem konventionellen Fernverkehrsfahrzeug reduziert sich die indirekte Sicht, da keine Innenspiegel vorhanden sind, auf die Sicht über die Außenspiegel oder elektronische Sichtsysteme.

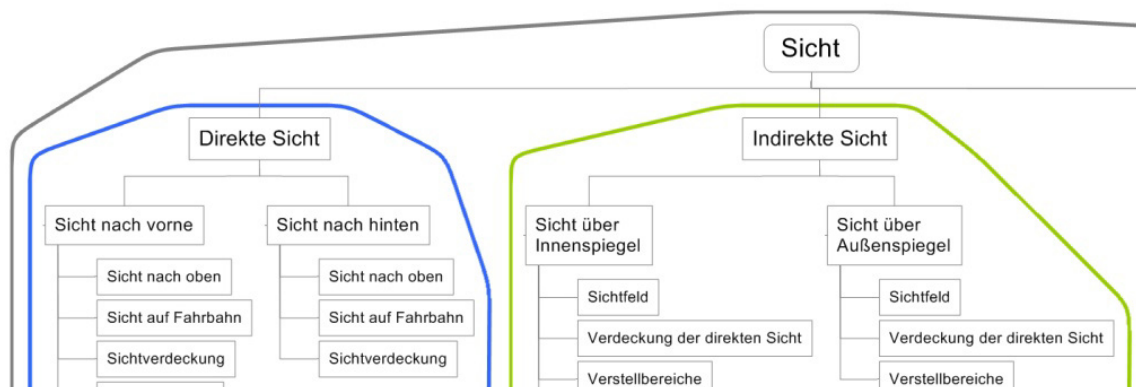


Abbildung 2-17: Auswahl der Prüfkriterien zur Bewertung der direkten und indirekten Sicht (nach Bothe 2010b S. 37)

Prozessschrittabhängig werden die Prüfkriterien der indirekten Sicht mit unterschiedlichen Bewertungswerkzeugen abgesichert (vgl. Abbildung 2-16). In der frühen Entwicklungsphase stehen noch keine funktionstüchtigen Hardware-Modelle zur Verfügung (Wagner 2007 S. 2) und die Bewertung der Sichtthemen wird mittels Simulationen durchgeführt (Seidl 1997 S. 1; Schaller 2008 S. 4; Bothe 2010b S. 31). Die Überprüfung der Spiegelsicht kann mit Hilfe von Renderings, die den physikalischen Strahlengang vom orientierten Mittelaugpunkt (GAUM) über die ausgerichtete Spiegelfläche bis hin zum Sichtobjekt berücksichtigen, erfolgen. In Abbildung 2-18 ist im Vergleich die Spiegelsicht für eine kleine Frau (P05F) und einen großen Mann (P95M) dargestellt. Bei dieser Überprüfung steht sowohl die Verortung als auch die Dimensionierung des Spiegels im Vordergrund. Der Außenspiegel soll zur Reduzierung der Verdeckung der direkten Sicht so weit vorne wie möglich, aber auch zur Gewährleistung der Sicht von kleinen Personen über die Spiegelfläche so weit hinten wie nötig platziert werden. Bei der Dimensionierung spielt die Größe und Ausrichtung der Spiegelfläche zur Erfüllung der gesetzlichen und kundenorientierten Vorgaben die Hauptrolle.



Abbildung 2-18: Überprüfung der beifahrerseitigen Spiegelsicht aus den Augpunktlagen einer kleinen Frau (links) und eines großen Mannes (rechts) (nach Bothe 2010b S. 94)

Wird die menschenbezogene Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) in den ergonomischen Auslegungsprozess integriert, müssen sowohl Kriterien der konventionellen indirekten Sicht, als auch der Sicht auf Anzeigen überprüft werden. Die notwendigen Bewertungswerkzeuge (vgl. Schaller 2008 S. 4; Wagner 2007 S. 2; Bothe 2010b S. 27) können dazu an die Komponenten eines KMS angepasst werden.

### 2.2.2 Ableitung der technologiebedingten Auslegungsparameter eines KMS

In Tabelle 2-1 ist die Ableitung ausgewählter Stellgrößen zur Auslegung eines Kamera-Monitor-Systems (KMS) dargestellt. Im Vergleich zum konventionellen Spiegelsystem können beim KMS einzelne Parameter unabhängig voneinander variiert werden. Unter der Vorgabe, dass im KMS dargestellte Objekte mindestens so groß wie im Referenz-Spiegelsystem erscheinen ( $M_{KMS} > M_{mirror}$ ; ISO/FDIS 16505 2014 S. 49) können der Vergrößerungsfaktor ( $M_{KMS}$ ), die Darstellungsfläche ( $A_{monitor}$ ) auf dem Monitor und der darin dargestellte Sichtbereich ( $\alpha_{monitor}$ ) frei ausgelegt werden. Da technologiebedingt keine optische Kopplung zwischen dem Auslegungsaupunkt (ORP) und dem außerhalb des Fahrzeugs positionierten Sichtobjekt vorliegt, kann der erfasste Sichtbereich ( $\alpha_{camera}$ ), unter Berücksichtigung aller für dynamische Sichtsituationen notwendigen Sichtbereiche, eigenständig festgelegt werden. Die in Kapitel 1.1.4 beschriebene durch gezielte Kopfbewegungen des Fahrers initiierte Verschiebung des dargestellten Sichtbereichs ist bei einem KMS nicht möglich. Der dargestellte Sichtbereich sollte für eine ergonomische Auslegung des KMS vom System automatisiert verschoben werden.

Tabelle 2-1: Ableitung der technologiebedingten Auslegungsparameter eines KMS

Kategorie	konventionelles Spiegelsystem	Kamera-Monitor-System (KMS)
<b>Magnifikation (Vergrößerungsfaktor zwischen erfassten und dargestellten Objekten)</b>	<b><math>M_{mirror}</math></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• von Abstand zw. ORP und Spiegelfläche (<math>a_{mirror}</math>), Spiegelkrümmung (<math>r_{mirror}</math>), Abstand zw. Spiegelfläche und Sichtobjekt (<math>d_{object}</math>), sowie Winkel zw. einfallendem und ausfallendem Sichtstrahl (<math>\beta</math>) abhängig (ISO/FDIS 16505 2014 S. 13)</li> </ul>	<b><math>M_{KMS}</math></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• von Abstand zw. ORP und Monitorfläche (<math>a_{monitor}</math>), und internem Zoomfaktor des KMS abhängig</li> <li>→ <b><math>M_{KMS}</math> kann unter Vorgabe <math>M_{KMS} &gt; M_{mirror}</math> frei gewählt werden</b> (ISO/FDIS 16505 2014 S. 49)</li> </ul>
<b>Darstellungsfläche</b>	<b><math>A_{mirror}</math></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• von Magnifikation (<math>M_{mirror}</math>) und dargestellttem Sichtbereich (mind. ECE-R46) abhängig</li> <li>• durch <math>F_L</math> (vgl. Kapitel 1.1.2) begrenzt</li> </ul> <p>(ECE-R 46/02 2009 Abs. 1.5.2.4) (ISO/FDIS 16505 2014 S. 13)</p>	<b><math>A_{monitor}</math></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• von Magnifikation (<math>M_{KMS}</math>) und dargestellttem Sichtbereich (mind. ECE-R46) abhängig</li> <li>• nicht durch <math>F_L</math> (vgl. 1.1.2) begrenzt</li> <li>→ <b>Darstellungsfläche kann unter Vorgabe <math>M_{KMS} &gt; M_{mirror}</math> frei gewählt werden</b> (ECE-R 46/02 2009 Abs. 1.5.2.4) (ISO/FDIS 16505 2014 S. 49)</li> </ul>
<b>erfasster Sichtbereich</b>	<b><math>\alpha_{mirror} = \text{dargestellter Sichtbereich}</math></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• von Magnifikation (<math>M_{mirror}</math>) und Darstellungsfläche (<math>A_{mirror}</math>) abhängig</li> <li>• durch <math>F_L</math> (vgl. Kapitel 1.1.2) begrenzt</li> </ul> <p>(ISO/FDIS 16505 2014 S. 13)</p>	<b>erfasster Sichtbereich = <math>\alpha_{camera} \neq \alpha_{monitor}</math></b> → <b>erfasster Sichtbereich kann unter Berücksichtigung aller notwendigen Sichtbereiche frei gewählt werden</b>
<b>dargestellter Sichtbereich</b>	<b><math>\alpha_{mirror} = \text{erfasster Sichtbereich}</math></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• von Magnifikation (<math>M_{mirror}</math>) und Darstellungsfläche (<math>A_{mirror}</math>) abhängig</li> <li>• durch <math>F_L</math> (vgl. Kapitel 1.1.2) begrenzt</li> </ul> <p>(ISO/FDIS 16505 2014 S. 13)</p>	<b>dargestellter Sichtbereich = <math>\alpha_{monitor} \neq \alpha_{camera}</math></b> → <b>dargestellter Sichtbereich kann unter Vorgabe <math>M_{KMS} &gt; M_{mirror}</math> frei gewählt werden</b> (ISO/FDIS 16505 2014 S. 49)
<b>optische Kopplung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• optische Kopplung zwischen ORP, Spiegelfläche und Sichtobjekt</li> <li>• dargestellter Sichtbereich = erfasster Sichtbereich</li> <li>• Sichtbereich kann vom Fahrer durch initiierte Kopfbewegung verschoben werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine optische Kopplung zwischen ORP und Sichtobjekt</li> <li>• dargestellter Sichtbereich <math>\neq</math> erfasster Sichtbereich</li> <li>• Sichtbereich kann vom Fahrer nicht durch Kopfbewegung verschoben werden</li> <li>→ <b>erforderlicher Sichtbereich sollte automatisiert dargestellt werden</b></li> </ul>

### 2.2.3 Festlegung der konzeptionellen Auslegungsparameter eines KMS

Da im Nutzfahrzeugumfeld noch kein Kamera-Monitor-System (KMS) zum Ersatz der Haupt- (Klasse II) und Weitwinkelspiegel (Klasse IV) (vgl. ECE-R 46/02 2009 Abs. 15.2.4.2; ISO/FDIS 16505 2014 S. 22) vorgestellt wurde, werden in diesem Kapitel, als Grundlage zur weiteren ergonomischen Auslegung eines KMS die konzeptionellen Randbedingungen des betrachteten Systems festgelegt. Für eine detaillierte Ausarbeitung und Bewertung von KMS-Konzepten wird an die Arbeit von Fornell-Fagerström und Gardlund (2012 S. 55 ff.) verwiesen. Die festgelegten Komponentenpositionen müssen in Bezug auf den Referenz-Sattelzug (vgl. Abbildung 2-19) während der dynamischen Sichtaufgabe (vgl. Kapitel 2.1.3) bewertet werden.



Abbildung 2-19: Referenz-Sattelzug zur Bewertung der Anbindungspositionen des Kamera-Monitor-Systems (KMS) (e. D. aus Daimler AG 2014)

Die wichtigsten Anforderungen an die Positionierung und Ausrichtung der Kamerakomponenten sind in Tabelle 2-2 aufgelistet. Beruhend auf diesen Anforderungen werden die Positionen der Kameras, wie in Abbildung 2-20 dargestellt, festgelegt. Die Kameras sind am Fahrerhausdach mit einem der Spiegelarmlänge vergleichbaren Abstand zur Seitenwand über den Türen angebracht. Die Objektive sind auf das jeweils geforderte Sichtfeld (ECE-R 46/02 2009 Abs. 15.2.4.2) ausgerichtet.

Tabelle 2-2: Anforderungen an die Kameraposition und -ausrichtung eines KMS

KMS-Komponente	Anforderung
Kamera	<ul style="list-style-type: none"> <li>maximale CO<sub>2</sub>-Reduktion soll erzielt werden (Devesa &amp; Indinger 2011 S. 59)</li> <li>minimale Windgeräusche sollen erzielt werden (Helfer 2013 S. 536 ff.)</li> <li>minimale Verschmutzung der Kamera und des Fahrzeugs sollen erzielt werden (vgl. Kopp &amp; Frank 2013 S. 720 ff.)</li> <li>Erfassung der geforderten Sichtbereiche (min. ECE-R 46/02 2009 Abs. 1.5.2.4)</li> </ul> <p>→ <b>Kameraposition und -ausrichtung kann festgelegt werden</b> (vgl. Fornell-Fagerström &amp; Gardlund 2012 S. 71)</p>

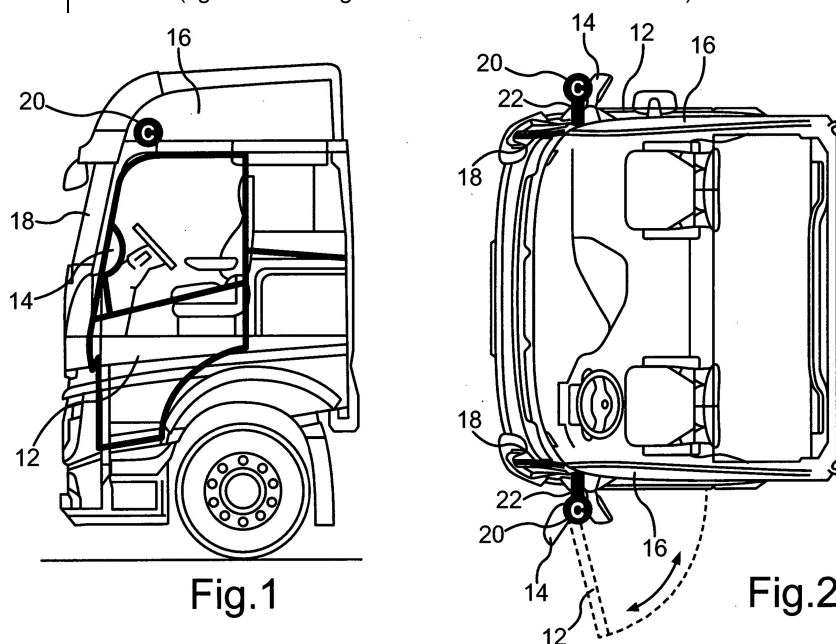
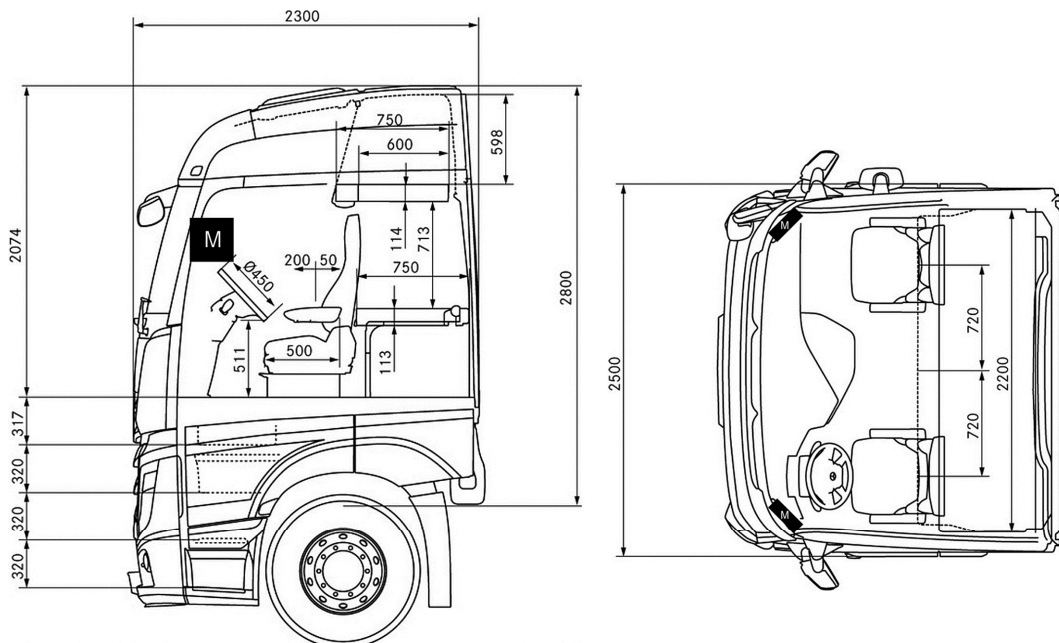


Abbildung 2-20: Festgelegte Position der Kameras des KMS (Bothe & Wohlfarth 2014 S. 5)

Die relevanten Anforderungen an die Positionierung und Ausrichtung der Monitorkomponenten sind in Tabelle 2-3 aufgelistet. Basierend auf diesen Anforderungen werden die Positionen der Monitore, wie in Abbildung 2-21 dargestellt, festgelegt. Die Monitore sind im Inneren des Fahrerhauses an den A-Säulen befestigt und normal auf den Auslegungsaugpunkt (ORP) (ISO/FDIS 16505 2014 S. 6 f.) ausgerichtet. Diese Positionierung reduziert die Verdeckung der direkten Sicht auf ein Minimum.

Tabelle 2-3: Anforderungen an die Monitorposition und -ausrichtung eines KMS

KMS-Komponente	Anforderung
Monitor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitore müssen sinnrichtig (links für FOV-Fahrerseite, rechts für FOV-Beifahrerseite) zum Fahrer angeordnet sein (ISO/FDIS 16505 2014 S. 95)</li> <li>• direkte Sicht auf den Monitor darf nicht durch andere Bauteile des Fahrzeugs behindert werden (ISO/FDIS 16505 2014 S. 51)</li> <li>• Sichtverdeckung der direkten Sicht aus dem Fahrzeug soll auf ein Minimum reduziert werden (ISO/FDIS 16505 2014 S. 51)</li> <li>• Darstellungsfläche soll zur Erfüllung der geforderten Darstellungsqualität optimal zum Auslegungsaugpunkt (ORP) ausgerichtet werden (ISO/FDIS 16505 2014 S. 68 ff.)</li> </ul> <p>➔ <b>Monitorposition und -ausrichtung kann festgelegt werden</b> (vgl. Fornell-Fagerström &amp; Gardlund 2012 S. 75)</p>



Legende: **M** Bilddarstellungseinrichtungen eines elektronischen Sichtsystems

Abbildung 2-21: Festgelegte Position der Monitore des KMS (e. D. nach Bothe & Wohlfarth 2014 S. 5)

Das Gesamtsystem bestehend aus Kameras, Signalverarbeitung und Monitoren muss von Seiten der ISO 16505 die geforderte Magnifikation (ISO/FDIS 16505 2014 S. 49) erfüllen und die in der ECE-R 46 definierten Sichtfelder (ECE-R 46/02 2009 Abs. 1.5.2.4) darstellen (vgl. Tabelle 2-4). Damit kann der zur Erfüllung von Standardsituationen mit gestrecktem Sattelzug dargestellte Sichtbereich auf der notwendigen Darstellungsfläche festgelegt werden. Die Erfüllung des Anspruches nach einer Monitordarstellung in der geforderten Bildqualität für alle Fahrer in allen Fahrsituationen ist durch die Ausrichtung der Monitore auf den Auslegungsaugpunkt (ORP) nicht hinreichend belegt. Es werden zusätzlich Informationen über die monitorbezogene Verortung der relevanten dynamischen Augpunktlagen benötigt. Auch über die vom Fahrer in dynamischen Sichtsituationen genutzten Bereiche der indirekten Sicht liegen noch nicht ausreichend Erkenntnisse vor. Die Grundlagen zur Untersuchung der noch offenen Punkte werden in den folgenden beiden Kapiteln behandelt.

Tabelle 2-4: Anforderungen an das KMS-Gesamtsystem

KMS-Komponente	Anforderung
<b>Gesamtsystem</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erfüllung der geforderten Magnifikation (ISO/FDIS 16505 2014 S. 49)</li> <li>Darstellung der geforderten Sichtbereiche (min. ECE-R 46/02 2009 Abs. 1.5.2.4)</li> </ul> <p>→ <b>dargestellter Sichtbereich (Standardsituationen) auf notwendiger Darstellungsfläche kann festgelegt werden</b></p>
<b>Offene Punkte</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Allen Fahrern muss in allen relevanten Fahrsituationen ein KMS-Bild mit der geforderten Bildqualität dargestellt werden. <b>(ISO/FDIS 16505 2014 S. 68 ff.)</b></li> <li>Die vom Fahrer in „Speziellen Fahrsituationen“ benötigten Sichtbereiche müssen automatisiert dargestellt werden. <b>(ISO/FDIS 16505 2014 S. 93 ff.)</b></li> </ul>

#### 2.2.4 Sichtwinkelabhängige Darstellungsqualität des Monitors

Über die Sichtwinkel ( $\Phi_{\text{monitor}}$ ) und ( $\theta_{\text{monitor}}$ ) des in Abbildung 2-22 dargestellte monitorbezogenen Polar-Koordinatensystems und den Abstand zwischen Monitor und Augpunkt ( $a_{\text{monitor}}$ ) kann jede Augpunktlage des Fahrzeugführers relativ zum im Fahrzeug verbauten Monitor beschrieben werden (ISO/FDIS 16505 2014 S. 22).

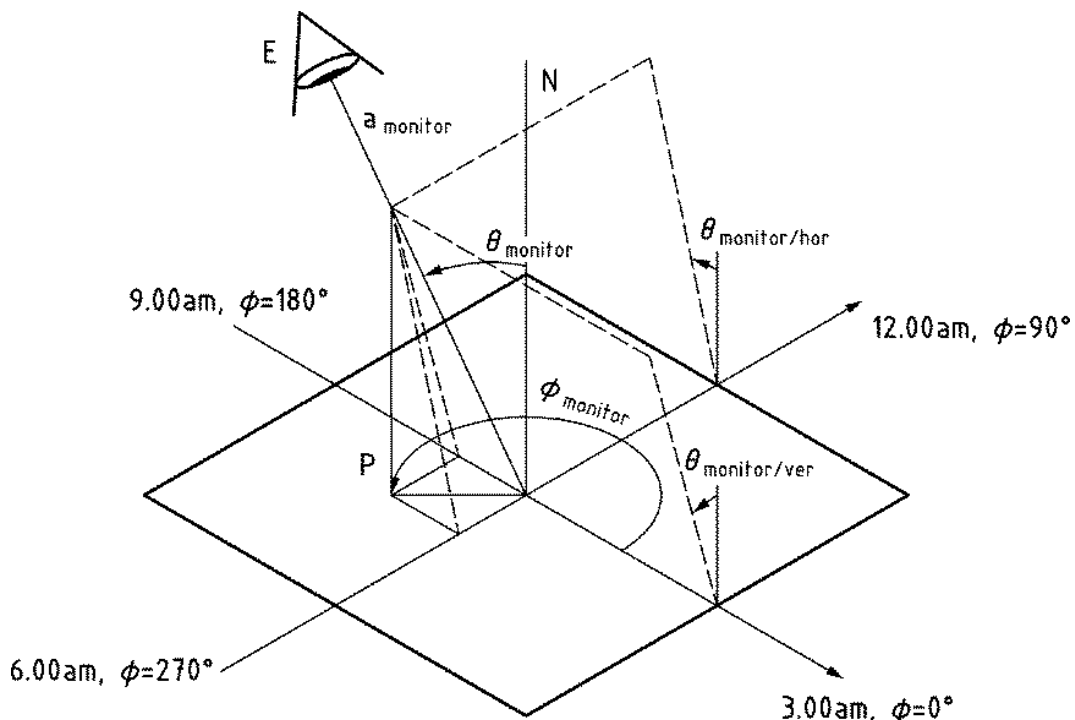


Abbildung 2-22: Polar-Koordinatensystem des Monitors (ISO/FDIS 16505 2014 S. 22)

Da die Darstellungsqualität des Monitors, wie in Abbildung 2-23 gezeigt wird, von den Sichtwinkeln ( $\Phi_{\text{monitor}}$ ) und ( $\theta_{\text{monitor}}$ ) abhängig ist (ISO/FDIS 16505 2014 S. 68), müssen, bei der ergonomischen Ausrichtung des Monitors neben dem konstruktiven Auslegungsaugpunkt ORP (ISO/FDIS 16505 2014 S. 6 f.) auch alle weiteren relevanten Augpunktlagen berücksichtigt werden. Insbesondere sind hier dynamische Augpunktlagen, die die Streubreite der Augpunktverteilung innerhalb der „Speziellen Fahrsituationen“ (ISO/FDIS 16505 2014 S. 93 ff.) beschreiben, von Interesse. Diese dynamischen Augpunktlagen sind von den Körpermaßen der Fahrer, der Fahrzeugvariante und der Sichtsituation abhängig (vgl. Jürgens et al. 2000 S. 5 f.; Speyer 2005 S. 4 ff.; ISO/FDIS 16505 2014 S. 107 ff.).



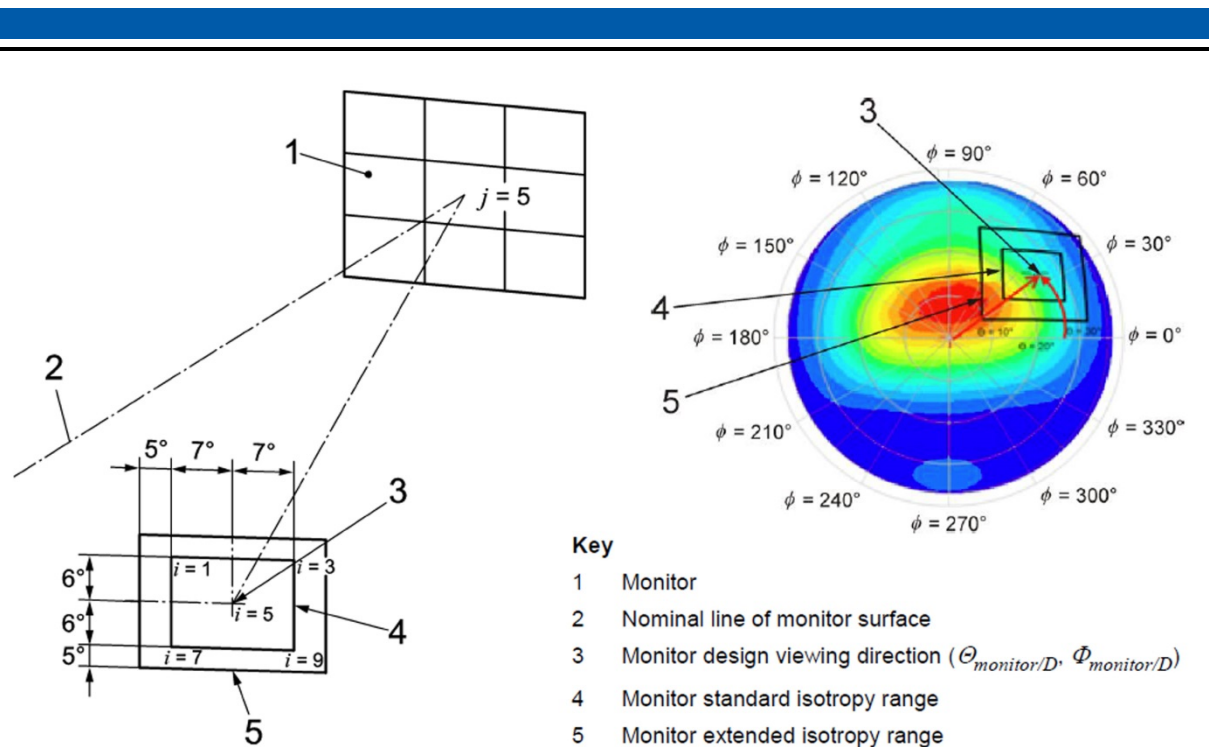


Abbildung 2-23: Messung der sichtwinkelabhängigen Darstellungsqualität des Monitors (e. D. nach ISO/FDIS 16505 2014 S. 69)

#### 2.2.5 Situationsabhängige Anpassung des dargestellten Sichtbereichs

Innerhalb des informativen Annex B der ISO 16505 (ISO/FDIS 16505 2014 S. 97 ff.) wird zur Erfüllung der Fahraufgabe in „Speziellen Fahrsituationen“ wie Abbiegevorgänge, Kreisverkehrsdurchfahrten und Rangiersituationen (ISO/FDIS 16505 2014 S. 125) die Erweiterung des dargestellten Sichtbereichs vorgeschlagen (ISO/FDIS 16505 2014 S. 109). In Abbildung 2-24 ist das für diesen Vorschlag herangezogene Ergebnis einer Auswertung der von Blomdahl (2012 S. 26) erhobenen Werte (vgl. ISO/FDIS 16505 2014 S. 108) zur durchschnittlichen und maximalen Kopfbewegung während „Spezieller Fahrsituationen“ dargestellt.

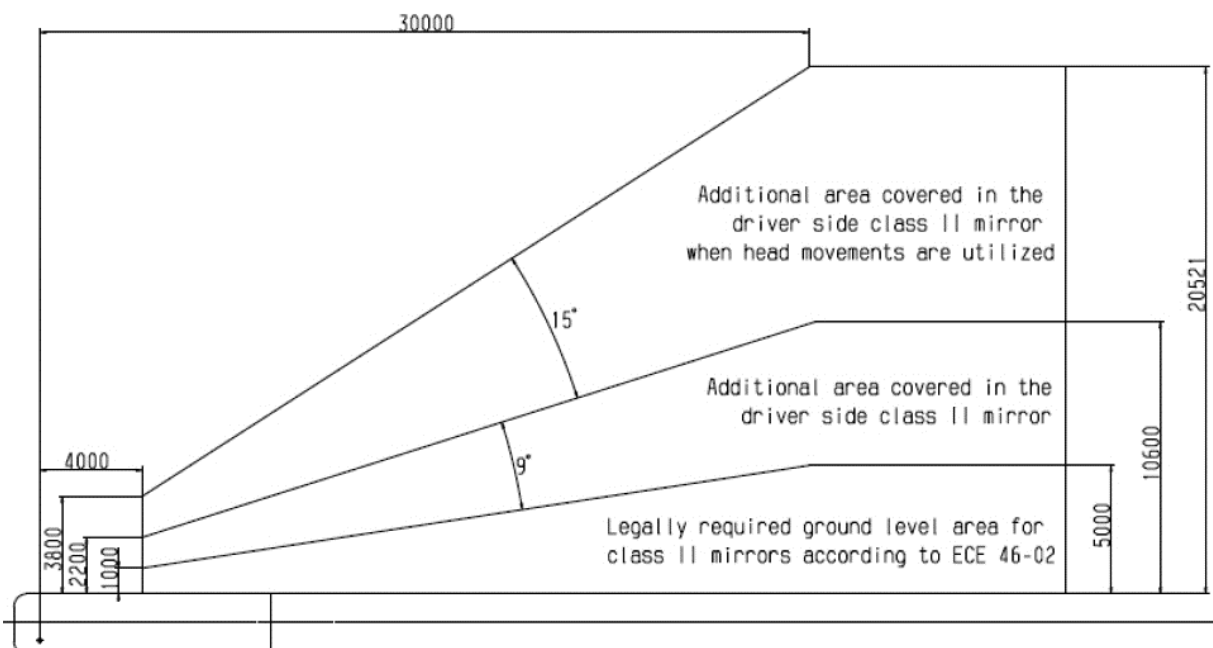


Abbildung 2-24: Vorschlag der Erweiterung des dargestellten Sichtbereichs für „Spezielle Fahrsituationen“ (Fornell-Fagerström & Gardlund 2012 Appendix D)

Wie von Fornell-Fagerström und Gardlund gezeigt wird, führt die Darstellung dieses stark erweiterten Sichtfeldes, bei gleichzeitiger Berücksichtigung der in ISO 16505 geforderten Magnifikation, zu sehr großen Displays, die die direkte Sicht in einem nicht zu tolerierendem Maß behindern (vgl. Fornell-Fagerström & Gardlund 2012 S. 49; Kapitel 2.1.3). Bei genauer Betrachtung der Sichtinteraktion von Fahrern mit konventionellen Spiegeln (Kapitel 1.1.4) fällt auf, dass die Fahrer das Sichtfeld durch die Kopfbewegung nicht erweitern sondern temporär verschieben (vgl. Bothe et al. 2012a S. 1638; Fornell-Fagerström & Gardlund 2012 S. 53; Bothe et al. 2013b S. 298 ff.; ISO/FDIS 16505 2014 S. 111). Die zur Umsetzung des Ansatzes zur dynamischen Verschiebung des dargestellten Sichtbereichs (vgl. Bothe et al. 2013e S. 1) notwendigen Auslegungsparameter sind in Abbildung 2-25 zusammengestellt.

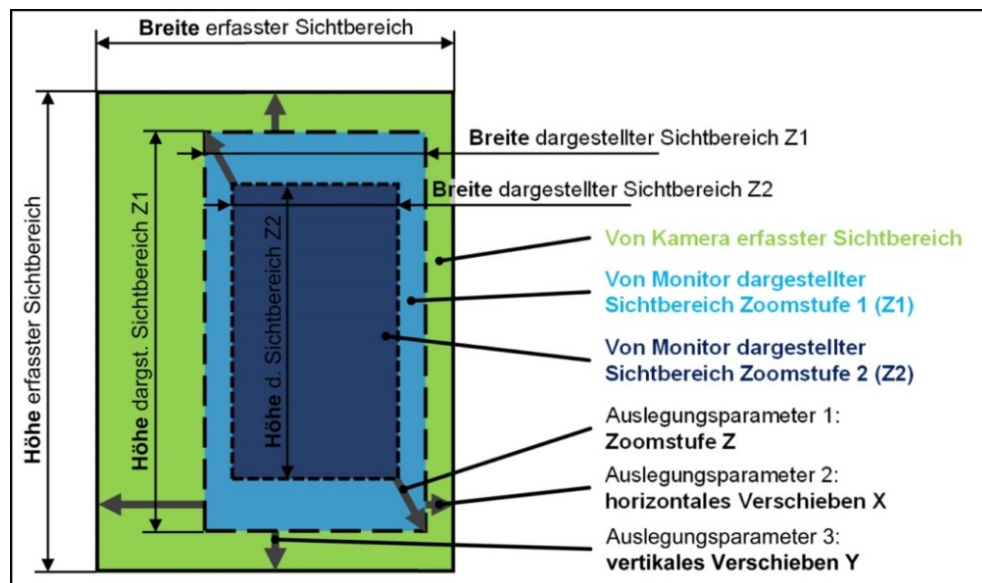


Abbildung 2-25: Ableitung der Auslegungsparameter des dargestellten Sichtbereichs eines KMS

Die Kamera erfasst einen zur Bereitstellung von Bildinformationen in allen Fahrsituationen ausreichenden Sichtbereich. Ein Ausschnitt des erfassten Sichtbereichs wird als dargestellter Sichtbereich auf dem Monitor angezeigt. Breite und Höhe des dargestellten Sichtbereichs können innerhalb der Randbedingungen aus Tabelle 2-1 durch Veränderung der Zoomstufe (Z) angepasst werden. Die Position des dargestellten Sichtbereichs wird über das horizontale (X) und vertikale (Y) Verschieben variiert (vgl. Bothe et al. 2013e S. 1 ff.).

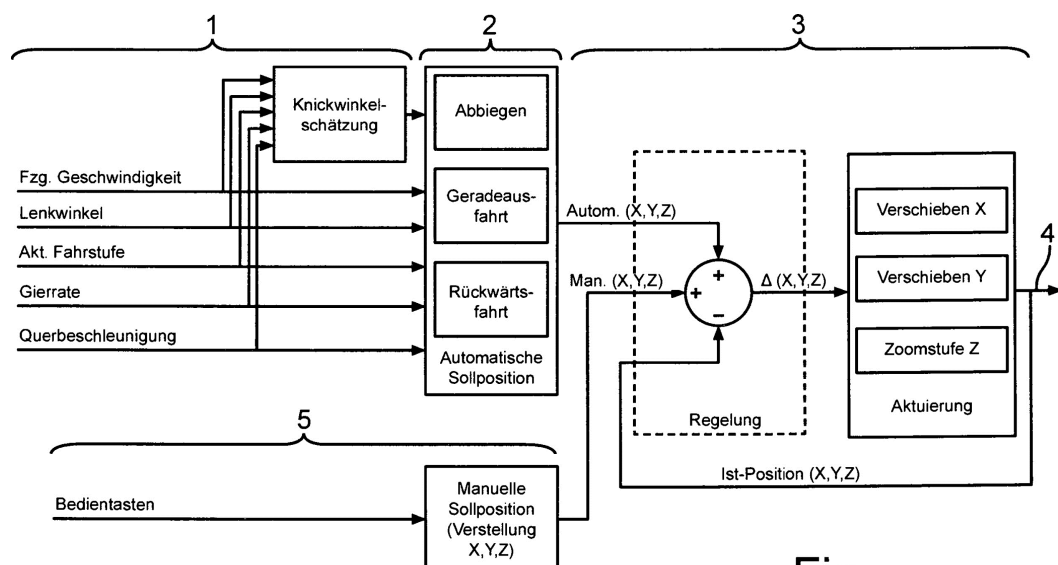


Fig.

Abbildung 2-26: Steuerungssystematik zur automatisierten Anpassung des dargestellten Sichtbereichs (Bothe et al. 2013e S. 9)

Die automatisierte Anpassung des dargestellten Sichtbereichs kann, wie in Abbildung 2-26 aufgezeigt, durch die gezielte fahrzeugparameterabhängige Steuerung umgesetzt und in einer Verschiebekennlinie abgelegt werden. Es werden Parameter wie die Fahrzeuggeschwindigkeit, der Lenkradwinkel und der daraus berechnete Knickwinkel zur Definition des notwendigen Sichtbereichs vorgeschlagen (Bothe et al. 2013e S. 9).

In Abbildung 2-27 sind mittels einer Simulation erzeugte situationsabhängig dargestellte Sichtbereiche eines KMS gezeigt. Der Wechsel von Sichtsituation 1 zu Sichtsituation 2 erfolgt über eine Verschiebung der dargestellten Auswahl des aufgenommenen Sichtbereichs. Zur Umsetzung innerhalb eines Realsystems wird eine Beschreibung, des von den Sichtsituationen abhängigen und durch Fahrzeugparameter automatisiert ansteuerbaren, vom Fahrer geforderten dynamischen Sichtbereich benötigt. Damit ist die Definition einer Kennlinie zur situationsabhängigen Darstellung der im KMS wiedergegebenen dynamischen Sichtbereiche möglich.

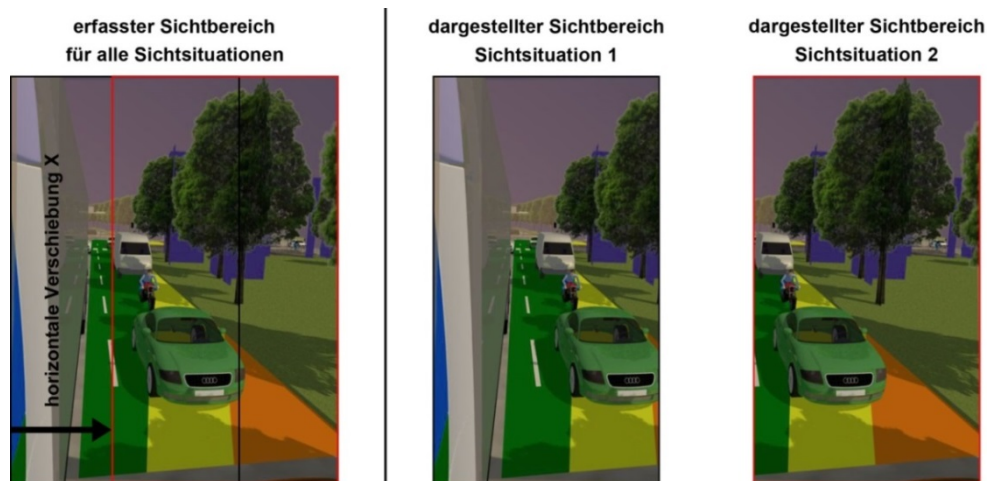


Abbildung 2-27: Simulation der situationsabhängigen Verschiebung des dargestellten Sichtbereichs (e. D. nach Fornell-Fagerström & Gardlund 2012 S. 53)

## 2.3 Sichtdatenerhebung zur ergonomischen Fahrzeugauslegung

Innerhalb des ergonomischen Absicherungsprozesses werden sowohl zur Validierung von simulierten Fahrhaltungen, als auch für die reproduzierbare virtuelle Sichtbewertung Sichtdaten, die durch Probandenuntersuchungen erhoben wurden, benötigt (vgl. Kapitel 2.2.1). Messungen der statischen Augpunktlagen innerhalb von Realfahrzeugen und Sitzkisten sind hierbei am weitesten verbreitet. Darum wird zunächst auf die anwendungsorientierte Erhebung von statischen Augpunktlagenverteilungen eingegangen. Es folgt eine Zusammenstellung der Methoden zur Messung dynamischer Sichtdaten, bei denen neben der Augpunktlage auch das zeitabhängige Blickverhalten des Probanden aufgezeichnet wird. Zur ergonomischen Auslegung von Fahrzeugen werden hierbei vornehmlich Blickdichteverteilungen, die auf der Messung dynamischer Sichtstrahlausrichtungen beruhen, herangezogen. Wie in Kapitel 2.2 gezeigt wurde, sind zur Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) zum Ersatz konventioneller Fahrzeugspiegel der Klassen I bis IV die vom Fahrer benötigten Sichtbereiche der indirekten Sicht von besonderem Interesse. Die veröffentlichten Verfahren zur Bestimmung der Spiegelsichtbereiche werden abschließend vorgestellt.

### 2.3.1 Messung statischer Augpunktlagen

Meldrum führte im Jahre 1965 eine Messung der fahrerindividuellen Augpunktlagen in drei unterschiedlichen Cabriolets durch (vgl. Meldrum 1965 S. 1 ff.). Pro Fahrzeug nahmen an dieser Untersuchung ca. 775 US-amerikanische Fahrer teil. Die Probanden, die zu 50% aus Frauen und 50% aus Männern bestanden, hatten die Möglichkeit vor der Messung den Fahrersitz in Längsrichtung einzustellen. Eine Anpassung der Sitzhöhe und des Lehnenwinkels war in den Fahrzeugen nicht möglich. Während der Messung der Augpunktlage, die mittels Stereophotogrammetrie durchgeführt

wurde, blickten die Versuchsteilnehmer mit gerader Kopfausrichtung auf ein, vor dem stehenden Fahrzeug befindliches, statisches Sichtziel. Basierend auf den durch Meldrum erhobenen Daten, erweitert durch die Erkenntnisse von Devlin (1968 S. 1 ff.), Hammond und Roe (1972 S. 1 ff.), wurden mittels der in Abbildung 2-28 dargestellten und im Folgenden näher beschriebenen Untersuchungsschritte die SAE J941 Augellipsoide für Pkws erstellt (vgl. SAE J941 1997 S. 8 f.). Im Jahre 1987 wurde die SAE J941 um die auf Datenerhebungen von Philippart et al. (1985 S. 1 ff.) beruhenden Lkw-Augellipsoide erweitert.

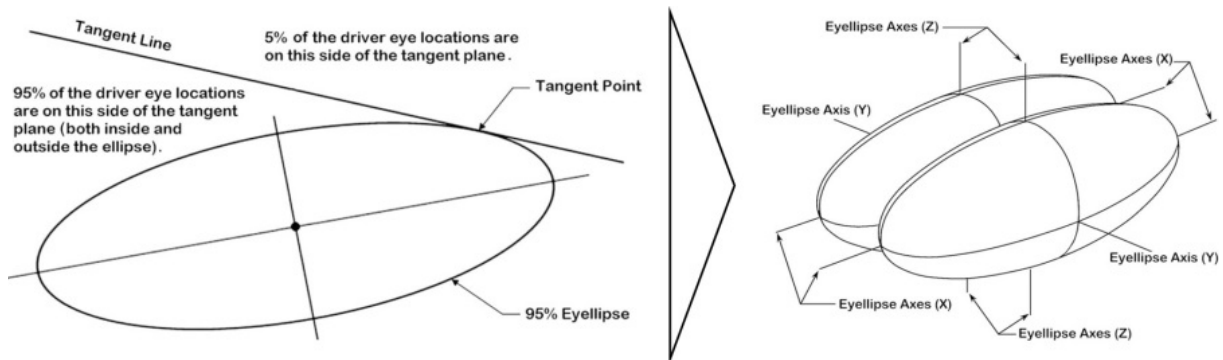


Abbildung 2-28: Untersuchungsschritte zur Erstellung der SAE J941 Augellipsoide (e. D. nach SAE J941 2010 S. 6 & 29)

Nach der Messung der Augpunktlagen wird innerhalb eines zweidimensionalen Verfahrens eine 95P-Ellipse konstruiert. Diese Ellipse hat die Eigenschaft, dass jede an sie angelegte Tangente die vorliegende Augpunktlagenverteilung im Verhältnis 95:5 teilt. Die 95P-Augellipsoide beinhalten aufgrund dieses Verfahrens nicht 95%, sondern nur 74% aller Augpunkte (SAE J941 2010 S. 29). Durch die Zusammenführung der 95P-Ellipsen jeder Raumebene werden die dreidimensionalen Augellipsoide erzeugt. Es entstehen für die Anwendung im Pkw und im Lkw individuelle Ellipsoide des rechten und des linken Auges (SAE J941 1997 S. 10 f.; vgl. Abbildung 2-30). Die 95P-Augellipsoide, die 56% aller Augpunktlagen enthalten, werden zur ergonomischen Absicherung von Fahrzeugkonzepten (vgl. Hudelmaier 2002 S. 44 ff.) insbesondere zur Maßkonzeption (vgl. Kapitel 2.2.1), eingesetzt.

Am Transportation Research Institute der University of Michigan (UMTRI) wurden in den 1990er Jahren erhebliche Unterschiede zwischen den mittels SAE J941 erzeugten und durch Messungen an aktuellen Fahrzeugen ermittelten Augellipsoiden festgestellt (Manary et al. 1998 S. 7). Zur Datenerhebung des UMTRI wurden die Augpunktlagen von Probandengruppen mit jeweils 50 bis 120 Fahrern in 33 verschiedenen Fahrzeugen ermittelt. Die Fahrer führten dazu eine 10 bis 20minütige Eingewöhnungsfahrt, während derer sie angewiesen wurden durch Anpassung der Sitzeinstellungen die komfortabelste Sitzhaltung herbeizuführen, durch. Direkt nach der Fahrt wurden die Augpunktlagen der in einer entspannten Haltung im Fahrzeug sitzenden Probanden mittels Stereophotogrammetrie oder Messung mit einem FARO-Messarm (vgl. Abbildung 2-29; Reed et al. 2000b S. 5 & 8), ermittelt. Bei sechs Fahrzeugen wurde die Augpunktlage sowohl vor als auch nach der Eingewöhnungsphase gemessen (Manary et al. 1998 S. 5).



Abbildung 2-29: FARO-Messarm zur Messung von statischen kopffesten Körperpunkten, wie der Augpunktlage, im Fahrzeug (Reed et al. 2000b S. 5 & 8)

Nach der Analyse der Messdaten konnte festgestellt werden, dass ein signifikanter Unterschied in der Augpunktlagenhöhe zwischen den Messungen vor und nach der Eingewöhnungsphase vorliegt und damit die Eingewöhnungsfahrt einen elementaren Untersuchungsschritt zur validen Ermittlung der



realen Augpunktlagenverteilung darstellt (Manary et al. 1998 S. 7). Des Weiteren wurden systematische Unterschiede zwischen den Kennwerten der Augellipse aus SAE J941 und den innerhalb der Untersuchung empirisch ermittelten Augellipse festgestellt. Außerdem wurde gezeigt, dass die Augpunktlage signifikant von der Sitzhöhe, der Lenkradposition und der Sitzeinstellung abhängt (Manary et al. 1998 S. 8). Diese Erkenntnisse führten im Jahre 2002 zu einer Neugestaltung der SAE J941 (vgl. Abbildung 2-30; SAE J941 2010 S. 1 f.). Die Positionierung und die Proportionen der Pkw-Augellipse wurden auf Grundlage der Erkenntnisse von Manary et al. (1998 S. 1 ff.) angepasst. Die Lkw-Augellipse blieben jedoch unverändert. Damit beruhen die heute verfügbaren Sichtdaten für Nutzfahrzeuge weiterhin auf einer Datenerhebung aus dem Jahre 1985 (Philippart et al. 1985 S. 1 ff.; SAE J941 2010 S. 32).

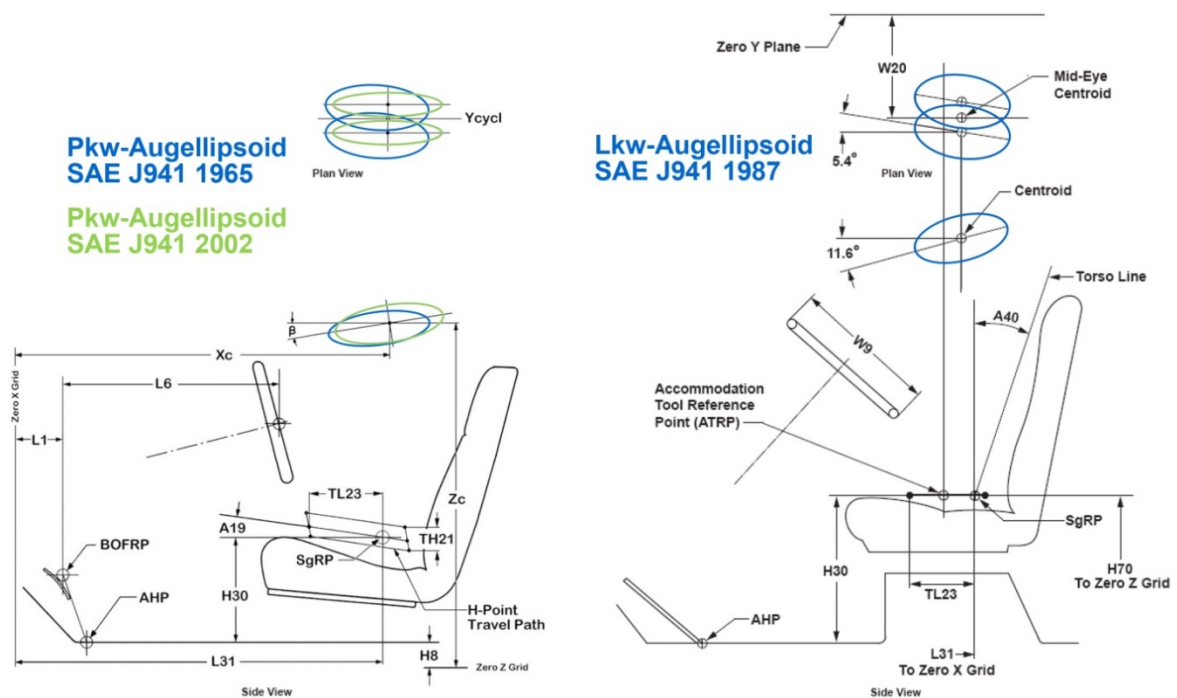


Abbildung 2-30: Positionierung der SAE J941 Augellipse von 1965/1987 (blau) und 2002 (grün) im Pkw- bzw. Lkw-Maßkonzept (e. D. aus SAE J941 1997 S. 10; SAE J941 2010 S. 12)

Fröhmel beschreibt in ihrer 2010 veröffentlichten Dissertation den Einsatz von statischen Augpunktlagenverteilungen zur Validierung der Simulationsergebnisse des RAMSIS-Krafthaltungsmodells (KHM) (vgl. Fröhmel 2010 S. 82 f. & 117 ff.). Zur Datenerhebung werden die Augpunktlagen von 44 Versuchspersonen, die das 5. Perzentil weiblich (16 VPs), sowie das 50. (16 VPs) und 95. Perzentil männlich (12 VPs) repräsentieren, während ihrer mehrmals eingenommenen individuell gewählten Sitzhaltung gemessen (Fröhmel 2010 S. 53 ff.). Zur Simulation der konzeptabhängigen Fahrzeugumgebung von drei unterschiedlichen Fahrzeugvarianten kommt das, mit Kameras zur Ermittlung der statischen Augpunktlage ausgestattete, variable Ein- und Ausstiegsmodell (VEMO; vgl. Abbildung 2-31; Rigel 2005 S. 35; Fröhmel 2010 S. 49) zum Einsatz. Bei der Auswertung der Videodaten wird das Messsystem PCMAN (vgl. Seitz & Bubb 1999 S. 1 ff.) verwendet.



Abbildung 2-31: Anordnung der Kameras zur Erfassung der Sitzhaltung im Prüfstand VEMO (vgl. Rigel 2005 S. 35; Fröhmel 2010 S. 49)



In Abbildung 2-32 und Abbildung 2-33 sind die, mittels Konzeptmaßdarstellungen innerhalb eines Roadsters und einer Limousine aufgezeichneten, statischen Augpunktlagenverteilungen der drei Körpergrößengruppen dargestellt (vgl. Fröhmel 2010 S. 82 f.). In beiden Fahrzeugvarianten liegen die Augpunktlagen der kleinen Probanden weiter vorne und tiefer als die Augpunktlagen der großen Versuchspersonen. Es ist eine von der Körperhöhengruppe abhängige Verteilung der Augpunktlagen zu beobachten. Die in der xz-Sitzmittelebene dargestellten Augpunktlagen sind ebenfalls von der Fahrzeugvariante abhängig. Die Mittellagen im Roadster liegen weiter hinten als in der Limousine (Fröhmel 2010 S. 82).

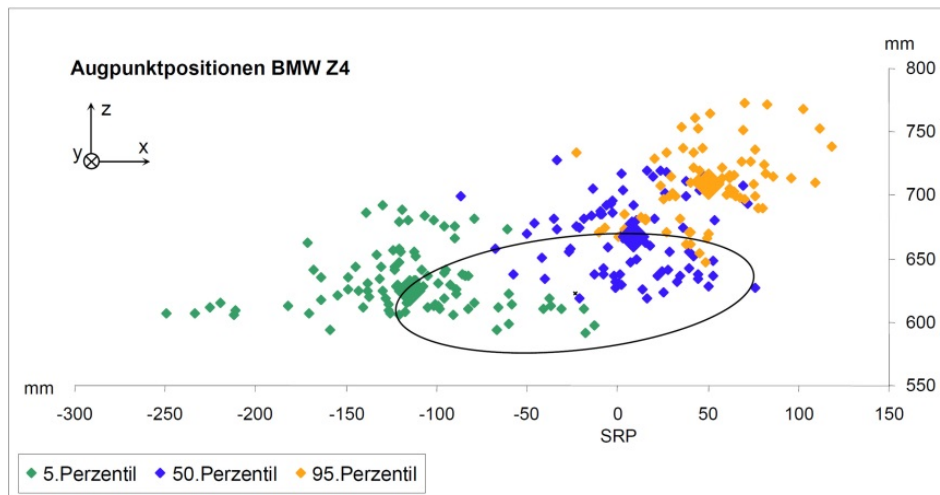


Abbildung 2-32: Augpunktlagenverteilung im BMW Z4 MJ 2002 Roadster (Fröhmel 2010 S. 82)

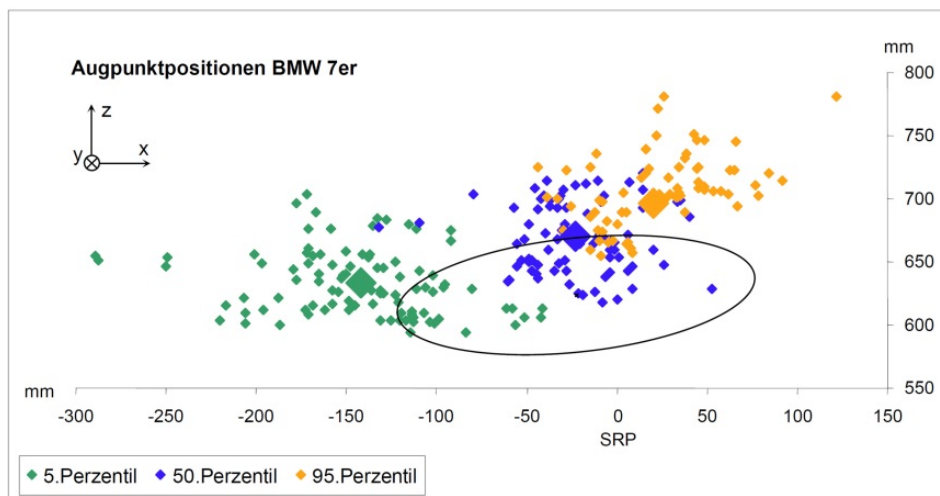


Abbildung 2-33: Augpunktlagenverteilung im BMW Z4 MJ 2002 Limousine (Fröhmel 2010 S. 83)

Innerhalb der ergonomischen Konzeptabsicherung (vgl. Kapitel 2.2.1) kommen durch Simulationen erzeugte und mittels Realdaten validierte Fahrhaltungen unterschiedlicher Auslegungsrepräsentanten zum Einsatz (vgl. Abbildung 2-34). Die Augpunktlagenverteilungen verschiedener Fahrzeugkonzepte unterscheiden sich dabei sowohl in ihrer Mittellage als auch in ihrer Streubreite (Fröhmel 2010 S. 82 f.; Bothe 2010a S. 80 f.). Zur Simulation der realitätsnahen Nutzung von Lastkraftwagen wird von Friedrichsen (2013 S. 1 f.) ein neues RAMSIS Lkw-Fahrhaltungsmodell vorgeschlagen. Das Haltungswahrscheinlichkeitsmodell basiert auf der Messung der statischen Körperhaltung von Lkw-Fahrern in fünf verschiedenen Fahrzeugvarianten. Zwischen den Augpunktlagenverteilungen der untersuchten Fahrzeugkonzepte, MB Actros MP2 (MJ 2004; 35 VPs), MB Axor-Land (MJ 2002; 39 VPs), MB Axor-Stadt (MJ 2002; 28 VPs), FL-CE (MJ 2013; 23 VPs) und MB Actros New (MJ 2012; 53 VPs), können signifikante Unterschiede festgestellt werden (Friedrichsen 2013 S. 48). Die standardisiert ermittelten statischen Augpunktlagen liegen im neuen Actros tiefer und in Fahrzeuglängsrichtung weiter hinten als im Vorgängermodell. Es muss also auch bei Nutzfahrzeugen von einer Abhängigkeit der Augpunktlagenverteilung von der Fahrzeugvariante ausgegangen werden.

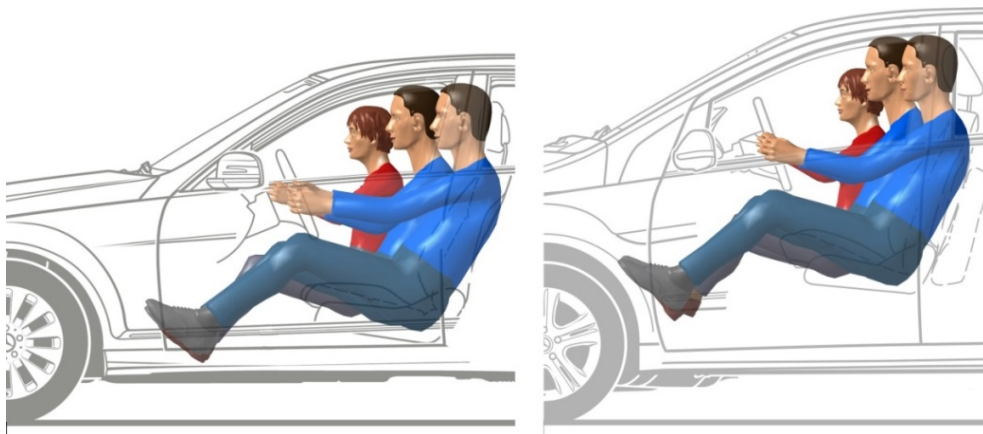


Abbildung 2-34: Durch realen Augpunktlagenverteilungen validierte RAMSIS-Testkollektive innerhalb einer Limousine (MB C-Klasse MJ 2009) und eines Kompaktvans (MB B-Klasse MJ 2009) (Bothe 2010a S. 80 f.)

Bei den vorgestellten Versuchen wurde die Augpunktlage der sog. „Idealen Fahrhaltung“, bei der der Fahrer komfortabel im Fahrzeug sitzt und gerade durch die Windschutzscheibe auf die Straße blickt (vgl. Hudelmaier 2002 S. 88; Bothe 2010b S. 61 ff.) ermittelt. Schaut der Fahrer jedoch in ein von dieser Sichtstrahlausrichtung abweichendes Sichtziel, wie in den Außenspiegel oder durch die Heckscheibe eines Pkws, geht die Ausrichtung auf das Blickziel mit einer die Augenbewegungen unterstützenden Kopf- und Torsodrehung einher (vgl. Hudelmaier 2002 S. 51). Damit werden die Augpunktlage und die Sichtstrahlorientierung in Bezug auf die Standardhaltung verändert.

Versuche zur Ermittlung von statischen, auf ein spezielles Sichtziel orientierten Augpunktlagen wurden von Seidl (1994 S. 92 ff.) und Hudelmaier (2002 S. 87 ff.) zur Validierung von Haltungssimulationen des Menschmodells RAMSIS durchgeführt. Von Seidl wurde ein Sichtprüfstand, bestehend aus einer minimalistischen Sitzkiste, die mit Signallampen zur Sichtzielsimulation von typischen Fahraufgaben, wie Spiegelblicken, Spurwechseln und Überholvorgängen umstellt ist, verwendet (vgl. Seidl 1994 S. 93). Aus der individuellen Ausgangshaltung heraus hatten die zehn Versuchsteilnehmer die Aufgabe, die aufleuchtenden Signallampen für 2 Sekunden zu fixieren. Während der Fixation des Sichtziels wurde die Körperhaltung und die dadurch festgelegte Augpunktlage mit Hilfe von standardisiert angeordneten Kameras aufgezeichnet und auf das Menschmodell übertragen.

Hudelmaier stellte fest, dass Fahrzeugrestriktionen wie die Position der Kopfstütze bei der Simulation von Umblickbewegungen auf Grundlage der von Seidl et al. (1994 S. 93) entwickelten Haltungswahrscheinlichkeitsberechnung nicht in ausreichendem Maße berücksichtigt werden und daher in diesem Fall zu nicht realitätsnahen Haltungen der Menschmodelle führen (Hudelmaier 2002 S. 88 f.). Zur Ermittlung geeigneter Restriktionen führte er einen Versuch mit 36 repräsentativ ausgewählten Probanden (vgl. Hudelmaier 2002 S. 98) durch. Bei der Aufzeichnung und Übertragung der individuellen Sitzhaltungen kam das kamerabasierte Messsystem PCMAN (vgl. Seitz & Bubb 1999 S. 1 ff.; Seitz & Bubb 2001 S. 1 ff.) zum Einsatz. Von Seidl und Hudelmaier konnten statische Augpunktlagen unter Einbeziehung von simulierten Sichtzielrestriktionen in Sitzkisten unter Laborbedingungen aufgezeichnet werden.

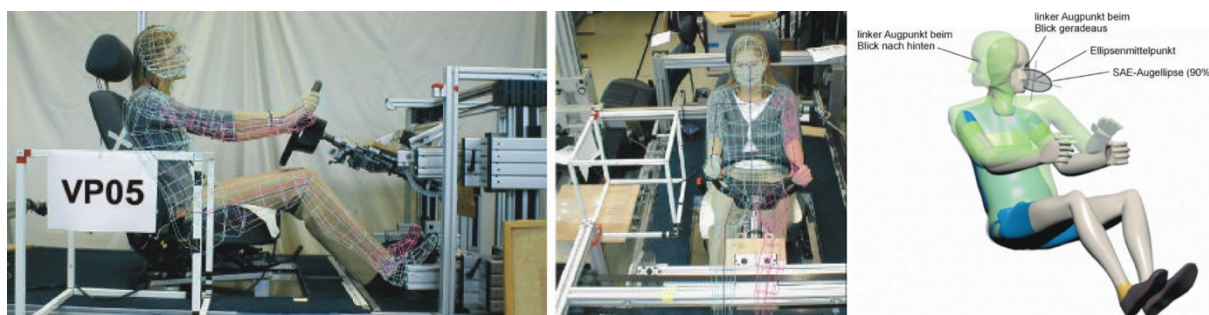


Abbildung 2-35: Untersuchungsschritte zur Ableitung von RAMSIS-Simulationen mit auf Sichtziel ausgerichteter Augpunktlage (oGAUM) (Hudelmaier 2002 S. 51 & 95)

### 2.3.2 Messung dynamischer Sichtdaten

Bei der Messung von dynamischen Sichtdaten zur ergonomischen Auslegung von Fahrzeugen werden neben den Augpunktlagenverteilungen auch die Sichtstrahlorientierungen über der Zeit aufgenommen. Das Blickverhalten der Probanden kann anschließend anhand der Fixationsdauer ausgewählter Sichtziele (vgl. Pannasch 2003 S. 8 ff.; Schweigert 2002 S. 88 ff.) oder der Blickdichteverteilungen (vgl. Brückmann et al. 2000 S. 73 ff.; Woyna 2013 S. 54) ausgewertet werden. Zur Aufzeichnung von dynamischen Sichtdaten mit Sichtzielen außerhalb des Fahrzeugs sind Realversuche im Feld besonders geeignet (Schweigert 2002 S. 54), da die dynamische Sichtinteraktion erheblich vom Realitätsgrad der Sichtumgebung abhängig ist (vgl. Scholly 2002 S. 6).

Zur Erarbeitung eines Beurteilungswerkzeugs der Sichteinschränkungen eines Pkws hat Woyna (2013 S. 67) das Blickverhalten von 44 Probanden innerhalb definierter Situationen im realen Straßenverkehr aufgezeichnet. Die probandenindividuellen Augpunktlagen wurden zweidimensional durch die Überlagerung eines Profilfotos mit dem fahrzeugfesten Messgitter (vgl. Abbildung 2-36; Woyna 2013 S. 63) erstellt. Damit liegt eine Dokumentation der Verteilung statischer Augpunktlagen auf der Sitzmittelebene vor. Es kann keine Aussage über das dynamische Verhalten aller drei Augpunktlagenkoordinaten während der dynamischen Sichtsituation getroffen werden.

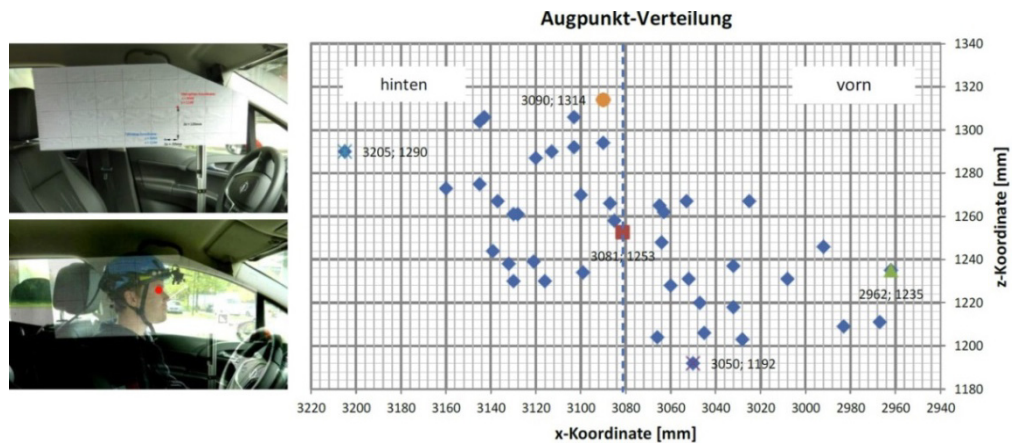


Abbildung 2-36: Ermittlung von statischen Augpunktlagenverteilungen (Woyna 2013 S. 63 ff.)

Während der Sichtsituationen werden mit Hilfe eines kopffesten Messsystems und im Fahrzeug platzierter Marker dynamische Sichtziele relativ zum fahrzeugfesten Kugel-Koordinatensystem (Woyna 2013 S. 59 f.) bestimmt. Durch Überlagerung der Sichtstrahlorientierungen konnten probanden- und situationsspezifische Verteilungen der Blickdichte berechnet werden. Aus diesen Blickverteilungen wird durch eine systematische Superposition die in Abbildung 2-37 dargestellte Gesamt-Blickdichteverteilung erstellt (Woyna 2013 S. 69).

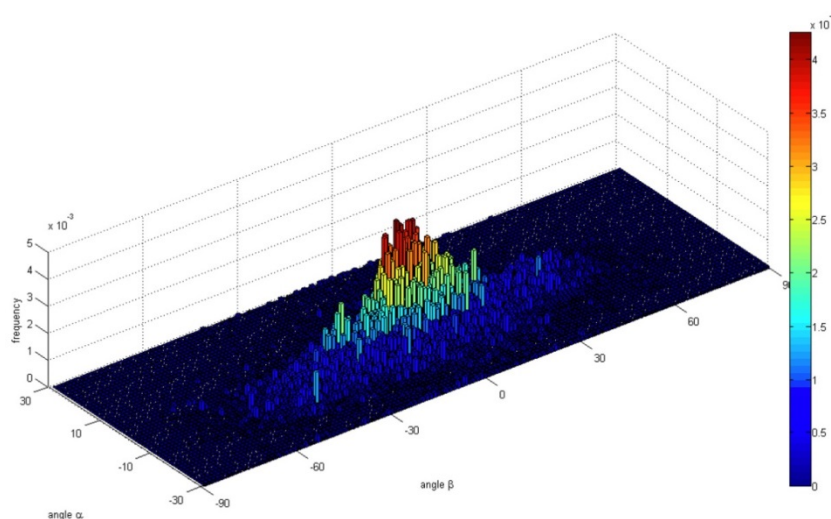


Abbildung 2-37: Relative Gesamt-Blickdichteverteilung (Woyna 2013 S. 159)



In einem weiteren Schritt wird die Gewichtung der Sichtbewertungszonen von der ermittelten Gesamtdichtevertielung abgeleitet (vgl. Abbildung 2-38; Woyna 2013 S. 73). Das erstellte Werkzeug zur Beurteilung der Sichtverdeckungen kann aufgrund seines Aufbaus in Kugelkoordinaten mittels eines festgelegten Referenzpunktes in jedem zu bewertenden Fahrzeug positioniert werden. Die Arbeit von Woyna beschreibt die Analyse und auslegungsorientierte Anwendung von dynamischen Sichtstrahlorientierungen, die auf statische Augpunktlagen referenziert werden. Dadurch tritt bei der Definition des Sichtbedarfs und der Bewertung von Sichteinschränkungen ein vom Abstand zum Sichtziel abhängiger Fehler auf (vgl. Woyna 2013 S. 61 f.).

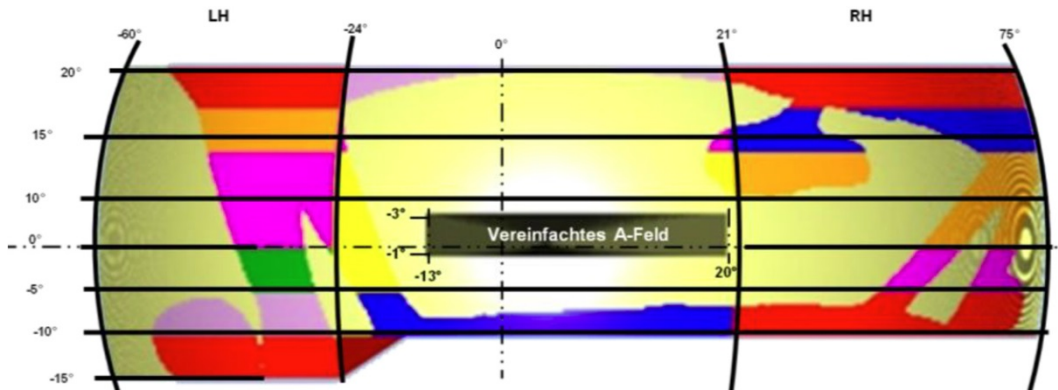


Abbildung 2-38: Gewichtete Sichtbewertungszonen (Woyna 2013 S. 73)

Scholly hat im Jahre 2001 in einem Fahrversuch mit 20 Probanden die dynamischen Sichtdaten zur Untersuchung der situationsspezifischen Abhängigkeit der Augpunktlagen- und Sichtstrahlverteilungen von fahrzeugbedingten Sichteinschränkungen erhoben (Scholly 2002 S. 1 ff.). Der Versuch wurde im realen Straßenverkehr mit Hilfe des sog. „Glaskuppelfahrzeuges“ (vgl. Abbildung 2-39) durchgeführt. Bei diesem Versuchsfahrzeug, das im fahrbereiten Zustand keine Sichteinschränkungen aufweist, können zur Relativbewertung gezielt Verdeckungen, wie A-Säulenkonturen und Dachbegrenzungen, aufgebracht werden. Damit ist der Einfluss dieser Sichtbeschränkungen auf die dynamische Augpunktlage und Sichtstrahlorientierung des Probanden ohne den Einfluss weiterer Fahrzeugparameter messbar (Scholly 2002 S. 10 & 13).



Abbildung 2-39: Glaskuppelfahrzeug und Messtechnik zur Bestimmung dynamischer Augpunktlagen und Sichtstrahlorientierungen (Scholly 2002 S. 10 ff.)

Zur Aufzeichnung der dynamischen Sichtstrahlorientierungen wurde das kopffeste in Abbildung 2-39 dargestellte Messsystem eingesetzt. Die Bestimmung der Positionierung und Ausrichtung des Messsystems relativ zum Fahrzeug-Koordinatensystem wurde mittels elektromagnetischer Sensoren realisiert. Durch die Messsensoren am Probanden und im Fahrzeug, sowie einer fahrerindividuellen Offsetbetrachtung zwischen Augpunkt und Messsystem-Koordinatensystem, konnten die dynamischen Augpunktlagen und Sichtstrahlorientierungen im Fahrzeug-Koordinatensystem mit einer Aufzeichnungsfrequenz von 50 Hz bestimmt werden (Scholly 2002 S. 13).

In Abbildung 2-40 sind ausgewählte Ergebnisse der Untersuchung von Scholly dargestellt (vgl. Scholly 2002 S. 26 f.). Die arithmetischen Mittelwerte der rechten Augpunktlage werden für besonders sichtkritische Verkehrssituationen (VS) im Vergleich zum SAE-Mittelauge (SAE J941 1997 S. 10) aufgetragen. Die Augpunktlagen der Fahrzeugvariante mit Abdeckung liegen im Vergleich zu den

Referenzmessungen im Glaskuppelfahrzeug weiter vorne und in Richtung der Fahrzeugmitte orientiert. In z-Richtung gibt es nur geringe Unterschiede zwischen den beiden Fahrzeugvarianten. Durch diese Untersuchung kann gezeigt werden, dass die Fahrer durch gezielte Kompensationsbewegungen nach rechts auf die Sichteinschränkung durch die linke A-Säule reagieren. In einem Fahrzeug ohne Sichteinschränkungen durch die Säulen ist die mittlere dynamische Augpunktlage weiter zur Mitte des Fahrersitzes hin orientiert. Von den Messdaten der dynamischen Augpunktlagen und Sichtstrahlorientierungen im Glaskuppelfahrzeug kann der restriktionsfreie Sichtbedarf zur Bewertung von A-Säulenkonzepten abgeleitet werden (vgl. Scholly 2002 S. 32 f.).

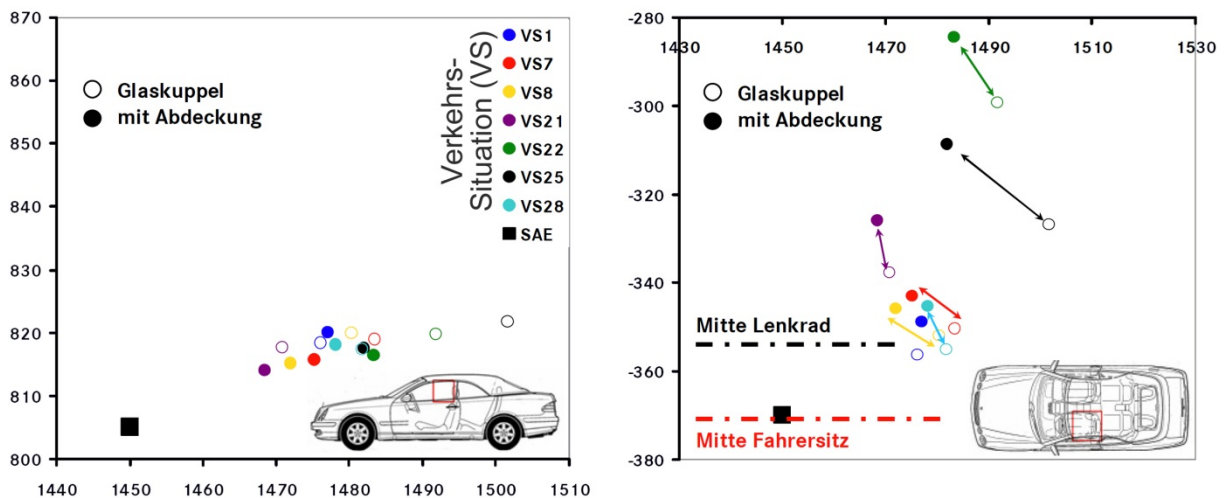


Abbildung 2-40: Von Sichteinschränkungen abhängige mittlere Augpunktlagen verschiedener Verkehrssituationen (Scholly 2002 S. 26 f.)

Bei den beschriebenen Untersuchungen von Scholly und Woyna wurden Augpunktlagen und Sichtstrahlorientierungen mit zwei eigenständigen Messsystemen und -methoden aufgezeichnet. Die statische Augpunktlage wurde mittels Photogrammetrie, die dynamische Augpunktlage mit Hilfe von elektromagnetischen Sensoren ermittelt. Die dynamische Sichtstrahlorientierung wurde bei beiden Versuchen mit einem kopffesten Messsystem bestimmt. Dynamische Augpunktlagen und Sichtstrahlorientierungen können auch berührungslos, mittels eines fahrzeugfesten optischen Messsystems wie faceLAB5 (vgl. Abbildung 2-41, FaceLAB5 2009b S. 1 ff.) oder Smart Eye Pro 5 (vgl. Smart Eye Pro 5 2013 S. 1 ff.), aufgezeichnet werden. Diese Messsysteme haben im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Systemen einige Vorteile (vgl. Link et al. 2008 S. 371 ff.). So ist keine Synchronisierung oder Datenkonvertierung zwischen den einzelnen Systemen notwendig. Der Proband wird nicht, wie bei einem kopffesten Messsystem, in seiner Bewegungsfreiheit behindert oder in der Sicht eingeschränkt. Während eines Feldversuchs kann sich die Versuchsperson innerhalb des Messraums frei bewegen, sowie ihn verlassen und wieder zurückkehren. Die dynamische Augpunktlage kann direkt anhand der Pupillenposition optisch gemessen (vgl. FaceLAB5 2009a S. 1 ff.) und muss nicht mit Hilfe von probandenindividuellen Offsetwerten zwischen kopffestem Koordinatensystem und Augpunkt (vgl. Scholly 2002 S. 13) bestimmt werden.



Abbildung 2-41: Fahrzeugfestes Stereokamerasystem zur kontaktlosen Messung von Augpunktlagen und Sichtstrahlorientierungen (FaceLAB5 2009b S. 1 f.)

Im Anhang dieser Arbeit ist eine Übersicht der heute zur Verfügung stehenden Messsysteme zur Sichtdatenerhebung zusammengestellt (vgl. Tabelle A-2). Für weitere Informationen wird an diese Übersicht und die zusammengestellten Quellen verwiesen.



### 2.3.3 Bestimmung von Sichtbereichen der indirekten Sicht

Der statische durch einen Spiegel zur Verfügung gestellte Sichtbereich kann durch das Aufstellen von Pylonen auf einer ebenen Testfläche ermittelt werden (vgl. Abbildung 2-42). Die Pylonen werden dabei so platziert, dass sie beobachtet vom vordefinierten Augpunkt an den Spiegelglasgrenzen gerade noch sichtbar sind. Durch eine Vermessung der positionierten Pylonen können die Begrenzungslinien des dargestellten Sichtbereichs auf der Fahrbahnoberfläche dokumentiert werden (vgl. Dodd 2009 S. 27 ff.).

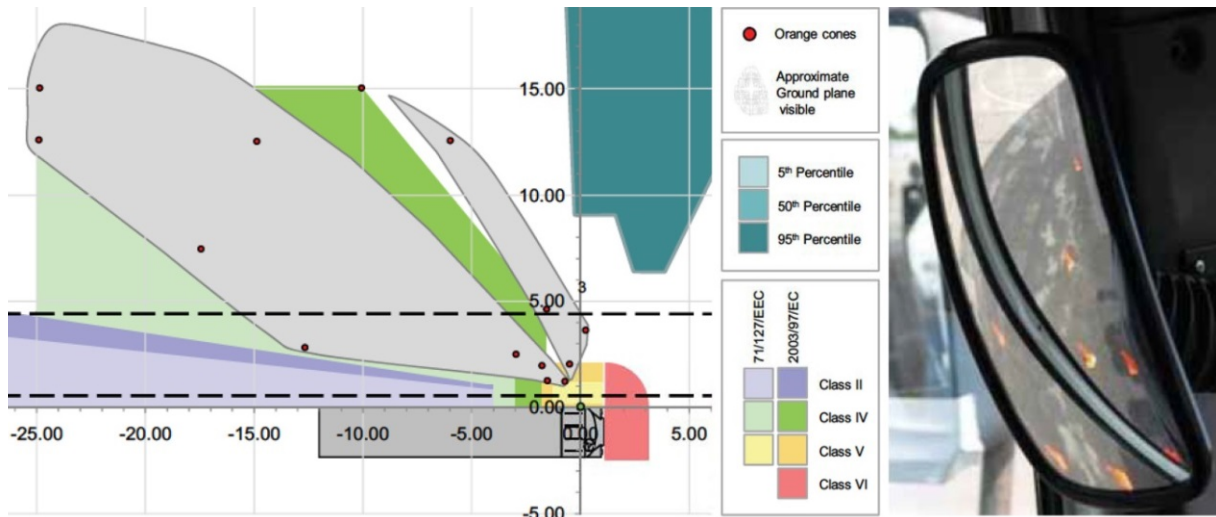


Abbildung 2-42: Bestimmung von statischen Sichtbereichen der indirekten Sicht durch Aufstellen von Pylonen (Dodd 2009 S. 31)

Eine weitere Methode zur Messung, der durch ein Spiegelsystem dargestellten Sichtfelder, wurde von Lehto Way und Reed vorgestellt (2003 S. 1). Dabei werden die Spiegelposition, -kontur und -krümmung, sowie die auf den Spiegel ausgerichtete Augpunktlage des Fahrers mit einem FARO-Messarm erfasst (vgl. Abbildung 2-43). Mit Hilfe eines Berechnungsverfahrens können die Sichtkegel vom Augpunkt in den Spiegel und von der Spiegelfläche in die Fahrzeugumgebung berechnet werden. Durch den Schnitt des ausfallenden Sichtkegels mit der Fahrbahnfläche entsteht ein zweidimensionales Abbild des im Spiegel dargestellten Sichtbereiches (Lehto Way & Reed 2003 S. 3; Blower 2007 S. 11). Die Validität wurde in drei Versuchen durch den Vergleich von berechneten und gemessenen Sichtfeldern bei Pkws (Reed et al. 2000b S. 1), Vans (Reed et al. 2001 S.1) und Lkws (Lehto Way & Reed 2003 S. 4; vgl. Abbildung 2-43) nachgewiesen.

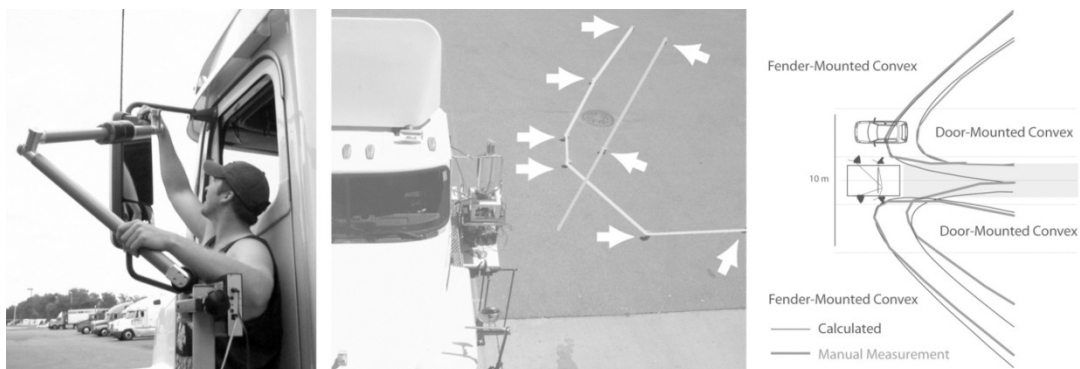


Abbildung 2-43: Messung und Berechnung von statischen Sichtbereichen der indirekten Sicht (Lehto Way & Reed 2003 S. 2 & 5)

Sichtbereiche der indirekten Sicht können auch ausschließlich durch Simulationen, bei denen alle relevanten Fahrzeugbauteile als digitale Geometriedaten vorliegen, bestimmt werden (vgl. Cook et al. 2011 S. 36). Dabei wird die auf den Spiegel ausgerichtete Augpunktlage mit Hilfe von Menschmodellen ermittelt (vgl. Bothe 2010b S. 80). Die Sichtkegel der indirekten Sicht werden aus dem simulierten Augpunkt über eine Reflektion an den Spiegelgeometriedaten berechnet

(vgl. Abbildung 2-44). Durch den Schnitt dieser Sichtkegel mit den Bezugsebenen wie der Fahrbahnebene werden zweidimensionale Visualisierungen der Abdeckungsbereiche erstellt (vgl. Lehto Way & Reed 2003 S. 5; Cook et al. 2011 S. 47). Zur Berechnung von Sichtkegeln der indirekten Sicht stehen bereits kommerzielle Werkzeuge wie die Absicherungs-Tools CAVA Vision (Transcat 2012 S. 2) und RAMSIS kognitiv (Human Solutions 2009 S. 1) zur Verfügung.

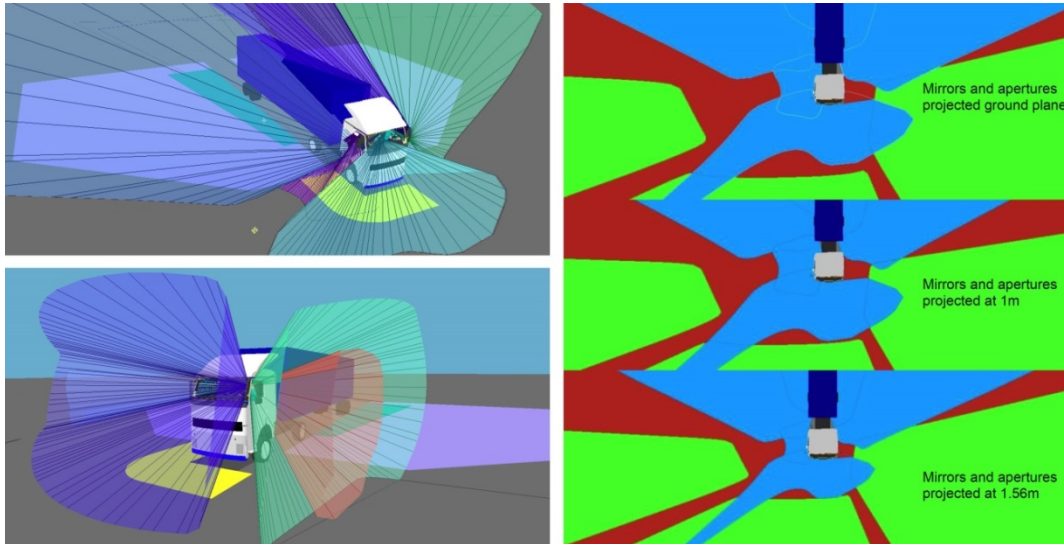


Abbildung 2-44: Simulation von statischen Sichtbereichen der indirekten Sicht mittels Sichtkegeln (links) und Schnittkonturen mit xy-Ebenen (rechts) (Cook et al. 2011 S. 38 ff.)

Die in Kapitel 1.1.4 gezeigte Visualisierung dynamischer Sichtbereiche basiert ebenfalls auf der Simulation von Sitzhaltungen, Augpunktlagen und Sichtstrahlorientierungen mit Hilfe von virtuellen Menschmodellen (vgl. Bothe et al. 2012a S. 1637 f.). In Abbildung 2-45 ist die dynamische Verschiebung der im Spiegel dargestellten Sichtbereiche durch Renderings aus der orientierten Augpunktlage dargestellt. Die dynamische Veränderung der Augpunktlage resultiert aus vom Fahrzeug auferlegten und durch den Fahrer initiierten Kopfbewegungen (vgl. Kapitel 1.1.4). Zur Beurteilung der dargestellten Sichtbereiche ist der Fahrzeugaufleger in violett, ein überholendes Fahrzeug in grün, das Sichtfeld Klasse II in orange, das Sichtfeld Klasse IV in gelb und der Himmel in blau visualisiert.

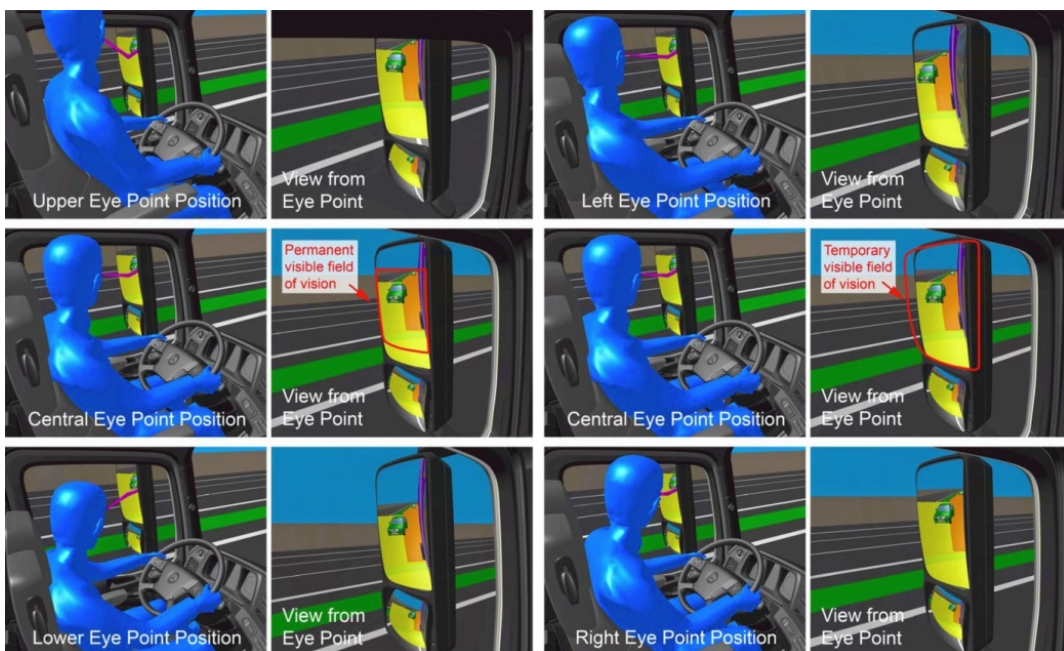


Abbildung 2-45: Visualisierung der im Spiegel dargestellten Sichtbereiche mittels RAMSIS-Simulation und Rendering aus orientierter Augpunktlage (Bothe et al. 2012a S. 1637 f.)

Zaindl et al. (2013 S. 1) stellen eine Methode zur Analyse der Kopf- und Körperbewegungen beim Blick in den Spiegel vor. Dazu werden mit Hilfe des Menschmodells RAMSIS in Catia Sichtziele außerhalb des üblichen indirekten Sichtbereichs definiert (vgl. Abbildung 2-46). Von den Sichtzielen, die von der hinteren Kante eines abgeknickten Standardaufliegers abgeleitet sind (vgl. Zaindl et al. 2013 S. 2), werden Sichtkegel über die Spiegeloberfläche in das Fahrerhaus projiziert. Unter Restriktionen, die den Unterkörper des Menschmodells statisch und die Hände am Lenkrad halten, wird ein Bewegungsablauf mit der Zielaugpunktlage innerhalb des Sichtkegels simuliert. Es resultieren einzelne Zwischenhaltungen, die den Raumbedarf und die Augpunkttrajektorie des dynamischen Bewegungsablaufes repräsentieren (vgl. Zaindl et al. 2013 S. 4).

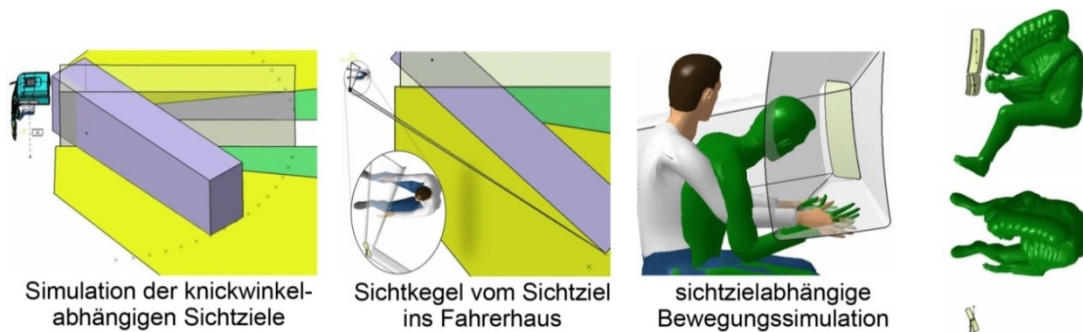


Abbildung 2-46: Arbeitsschritte zur Erstellung von sichtzielabhängigen Bewegungssimulationen und resultierender Bewegungsraum (e. D. aus Zaindl et al. 2013 S. 3 ff.)

Zur Validierung der Haltungssimulation werden die berechneten Haltungen mit den auf Basis von Realdaten rekonstruierten Einzelhaltungen des Menschmodells verglichen (vgl. Zaindl et al. 2013 S. 5 & Zaindl et al. 2014 S. 2). Innerhalb eines Feldversuchs werden die Körperhaltungen und Sichtstrahl-orientierungen von 17 Probanden ( $N = 17$ ) während Rangiersituationen mit großen positiven und negativen Knickwinkeln aufgezeichnet. Der eingesetzte Sattelzug soll vom Probanden rückwärts in eine  $90^\circ$  zur Startposition links oder rechts angeordnete Parklücke geschoben werden. Zur Aufzeichnung der Körperhaltungs- und Sichtdaten wird die in Abbildung 2-47 dargestellte markerbasierte Messsystemanordnung im Lkw-Fahrerhaus eingesetzt. Die markierten Körperpunkte werden mit den sechs am Fahrerhaushimmel platzierten Kameras des Vicon Nexus Systems (vgl. Anhang A2) erfasst und in Fahrzeugkoordinaten aufgezeichnet. Zur Erhebung der dynamischen Sichtstrahlorientierung wird das kopffeste und markerbasierte Blickerfassungssystem Dikablis (vgl. Anhang A2) verwendet. Da die beiden Messsysteme miteinander verlinkt sind können nach dem Versuch die Körperpunktkoordinaten und die zeitsynchronen Sichtstrahlvektoren jedes Aufzeichnungsintervalls exportiert werden (vgl. Zaindl et al. 2013 S. 5). Eine erste Auswertung des Fahrversuchs zeigt, dass zur Verschiebung des dargestellten Sichtbereichs sowohl im linken als auch im rechten Hauptspiegel hauptsächlich Kopfbewegungen in x-Richtung eingesetzt werden. Der Mittelwert der maximalen Auslenkungen der Augpunktlage beim Blick in den linken Hauptspiegel (HSL) beträgt in x-Richtung 215,9 mm ( $n = 30$ ;  $SD = 85,9$  mm) und in y-Richtung 8,5 mm ( $n = 30$ ;  $SD = 60,8$  mm). Für den Blick in den rechten Hauptspiegel (HSR) liegen die Werte bei 310,6 mm ( $n = 27$ ;  $SD = 120,8$  mm) in x-Richtung und -26,8 mm ( $n = 27$ ;  $SD = 60,0$  mm) in y-Richtung (vgl. Zaindl et al. 2014 S. 2). Diese Werte lassen, mit dem Hintergrund des in Bezug auf die Fahrzeuglängsachse symmetrischen Versuchsaufbaus, einen größeren Bedarf des Kopfbewegung beim Blick in den HSR verglichen mit dem HSL vermuten. In weiteren Studien mit größerer Probandenanzahl sollen dynamische Augpunktlagenverteilungen als Grundlage zur Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) erhoben werden (Zaindl et al. 2014 S. 3).

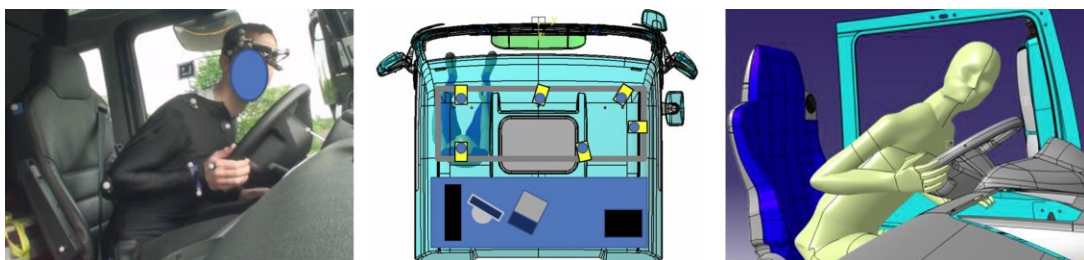


Abbildung 2-47: Markerbasierte Aufzeichnung von Realdaten zur Rekonstruktion der Haltung beim Blick in den HSR (e. D. aus Zaindl et al. 2013 S. 5 & Zaindl et al. 2014 S. 2)



Zur Rekonstruktion der im Realversuch aufgezeichneten Fahrhaltungen werden wiederum Haltungssimulationen mit RAMSIS durchgeführt. Dabei werden die Augpunktlagen und Sichtstrahlorientierung als Restriktionen zur Berechnung der Fahrhaltung eingesetzt. Ein Vergleich der simulierten und rekonstruierten Fahrhaltungen beim Blick in den linken Hauptspiegel (HSL) ist in Abbildung 2-48 dargestellt (vgl. Zaindl et al. 2014 S. 3). Die rekonstruierten Fahrhaltungen stellen eine Möglichkeit zur Visualisierung erhobener Messdaten dar.

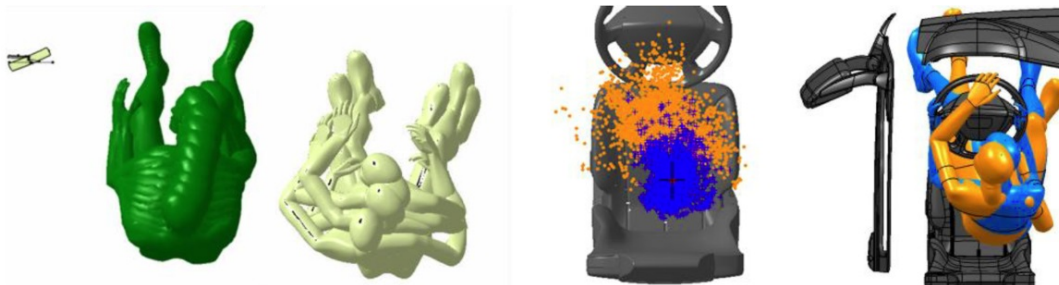


Abbildung 2-48: Vergleich der simulierten und von Realversuchen rekonstruierten Haltungen beim Blick in den HSL (Zaindl et al. 2014 S. 3)

Mit Hilfe der vorgestellten Simulationsmethoden, durch Renderings oder Sichtkegel, kann das dynamische Verhalten der vom Fahrer genutzten Sichtbereiche ermittelt und ausgewertet werden. Die Simulation muss, um Informationen über das situations- und fahrerindividuelle Nutzungsverhalten der Spiegelsysteme liefern zu können, auf repräsentativen Realdaten basieren. Als Eingangsgrößen sind neben den statischen Werten der Spiegelgeometrie und -ausrichtung, dynamische Informationen über die Augpunktlage und die Sichtstrahlorientierung notwendig. Diese Auslegungsdaten müssen für alle Auslegungsrepräsentanten während der dynamischen Fahrt durch die relevanten Verkehrssituationen in unterschiedlichen Fahrzeugvarianten ermittelt werden. Obwohl die Messtechnik zur Erfassung der dynamischen Sichtdaten verfügbar ist (vgl. Kapitel 2.3.2), ist keine repräsentative auf Realdaten basierende Untersuchung zur Ermittlung der dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht bekannt.

## 2.4 Ableitung der Forschungsbedarfe

Zur ergonomischen Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) werden Informationen über das erlernte dynamische Sichtverhalten der Fahrer während der Nutzung konventioneller Spiegelsysteme benötigt (vgl. Bothe et al. 2012a S. 1637). Obwohl die erforderlichen Sichtdaten mit der verfügbaren Technik aufgezeichnet und analysiert werden können ist keine Datenerhebung im geforderten Umfang bekannt. Aktuell werden sichtrelevante Systeme auf Grundlage von Sichtdatenumfängen im maximal dreistelligen Bereich ausgelegt (vgl. Bothe 2010b S. 94; Fröhmel 2010 S. 82 f.; Woyna 2013 S. 63 ff.). Dazu werden die statischen Augpunktlagen der sog. „Idealen Fahrhaltung“ mit einer auf die Fahrbahn gerichteten Sichtstrahlorientierung herangezogen (vgl. Hudelmaier 2002 S. 88; Bothe 2010b S. 61 ff.). Das Nutzungsverhalten während dynamischer Sichtsituationen kann durch diese Vorgehensweise nicht realitätsnah berücksichtigt werden (vgl. Bothe et al. 2012a S. 1638).

Durch den Technologiewechsel vom konventionellen Spiegelsystem zum Kamera-Monitor-System (KMS) ist eine Auslegung des dynamischen Darstellungsverhaltens möglich und notwendig (vgl. ISO/FDIS 16505 2014 S. 109). Dazu werden Informationen über die dynamische Sichtinteraktion mit etablierten Systemen der indirekten Sicht benötigt (vgl. Bothe et al. 2013b S. 298 ff.; Zaindl et al. 2013 S. 4). Zum einen sind dies die vom Fahrer zur Bewältigung der fernverkehrstypischen Transportaufgabe genutzten dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht, zum anderen die dynamischen Augpunktlagen, die er während der Fahrt einnimmt. Durch diese Anforderung wird von jedem repräsentativen Lkw-Fahrer eine Vielzahl an Sichtdatensätzen, die während der dynamischen Sichtinteraktion aufgezeichnet wurden, benötigt. Mit der Steigerung des Messdatenumfangs wächst auch der Aufwand zur repräsentativen Datenauswahl und auslegungsorientierten Analyse. Die etablierten Auslegungswerkzeuge müssen den Dimensionen der neuen Datenumfänge angepasst werden.

Aufgrund des innovativen Charakters der Analyse dynamischer Sichtsituationen müssen zunächst die grundlegenden Unterschiede zwischen statischen und dynamischen Augpunktlagenverteilungen, sowie insbesondere die Eigenschaften dynamischer Augpunktlagenverteilungen näher betrachtet werden. Um die gewonnenen Erkenntnisse zur ergonomischen Auslegung von KMS nutzen zu

---

können, müssen die Fahrzustandsparameter mit dem Ziel der Identifizierung eines Prädiktors des dynamischen Sichtbedarfs analysiert werden. Letztendlich ist eine Darstellung und Untersuchung der vom Fahrer genutzten dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht für die Entwicklung eines Realsystems von entscheidender Bedeutung. Zur Untersuchung dieser Forschungsbedarfe wurden Hypothesen, die in den folgenden Kapiteln detailliert vorgestellt werden, aufgestellt.

---

#### 2.4.1 Statische und dynamische Augpunktlagenverteilungen

---

Zur Durchführung und Validierung menschenmodellbasierter Haltungssimulationen werden repräsentative Augpunktlagenverteilungen benötigt. Auch die Berechnung und Bewertung der direkten und indirekten Sicht muss auf validen, die Nutzung im Realfahrzeug repräsentierenden, Augpunktlagenverteilungen basieren. Die Absicherung von Displayöffnungswinkeln und die Berechnung dynamisch genutzter Sichtbereiche der indirekten Sicht sollten ebenfalls auf den Verteilungen der dynamischen Augpunktlagen beruhen. Da bislang Augpunktlagenverteilungen in repräsentativem Umfang nur statisch gemessen wurden, ist zunächst die Betrachtung von statischen und dynamischen Augpunktlagenverteilungen von Interesse.

Auf Grundlage der Betrachtung der Augpunktlage in dynamischen Sichtsituationen (vgl. Kapitel 1.1.4) und den Erkenntnissen von Scholly (2002 S. 26 f.) und Zaindl (2014 S. 2) wird angenommen, dass die Augpunktlagenverteilung während dynamischer Sichtsituationen von der Augpunktlagenverteilung der statischen idealen Fahrhaltung abweicht. Die Fahrer führen zur Verschiebung der im Spiegel dargestellten Sichtbereiche und zur Verbesserung der direkten Sicht gezielte Kopfbewegungen durch (vgl. Bothe et al. 2012a S. 1638). Daher wird die folgende Hypothese aufgestellt:

**Hypothese 1:** Die mittleren dynamischen Augpunktlagen unterscheiden sich von den mittleren statischen Augpunktlagen. (H1)

Zur Beschreibung der statischen und dynamischen Augpunktlagenverteilung wird das Maß der Streubreite eingeführt. Die Streubreite gibt den probandenindividuellen Mittelwert der Positionsabweichung zum Mittelwert der gesamten Stichprobe an. Aufgrund der beobachteten Kopfbewegungen wird folgende Hypothese formuliert:

**Hypothese 2:** Die Streubreite dynamischer Augpunktlagen ist größer als die Streubreite statischer Augpunktlagen. (H2)

Wie in den Untersuchungen von Fröhmel (2010 S. 119) und Cook et al. (2011 S. 36) gezeigt wurde, ist die Position der statischen Augpunktlage innerhalb des Fahrzeugs von der Körperhöhe der Probanden abhängig. Aufgrund der konzeptionellen Randbedingungen innerhalb einer Lkw-Kabine erstreckt sich die Variation der statischen Augpunktlagen hauptsächlich in z-Richtung. Es wird daher angenommen, dass auch die Augpunktlagenverteilung während dynamischer Sichtsituationen von der Körperhöhe der Probanden abhängt und dieser Zusammenhang in differenten mittleren Augpunktlagen der Körpergrößengruppen nachgewiesen werden kann.

**Hypothese 3:** Die dynamischen Augpunktlagen kleiner Probanden liegen in Fahrzeughochrichtung tiefer als die dynamischen Augpunktlagen größer Probanden. (H3)

Die Population der Lkw-Fahrer unterscheidet sich von der Gesamtbevölkerung im anthropometrischen Merkmal des Taillenumfangs (vgl. Jürgens 1999 B-1.2.80; Jürgens et al. 2000 S. 31). Damit ist bei dieser Personengruppe eine Abhängigkeit der Augpunktlage von der Korpulenz der Probanden zu untersuchen. Korpulente Fahrer benötigen aufgrund ihrer Körperfülle mehr Platz zu angrenzenden Bedienelementen. So können schlanke Fahrer beispielsweise das Lenkrad weiter als korpulente Fahrer an ihren Hüftpunkt heranziehen. Diese Einschränkungen können einen Einfluss auf die gefundene Fahrhaltung und damit auf die dynamische Augpunktlage haben. Es wird daher folgende Hypothese aufgestellt:

**Hypothese 4:** Die dynamischen Augpunktlagen schlanker Probanden liegen in Fahrzeugfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen korpulenter Probanden. (H4)

Innerhalb ihrer Untersuchung kann Fröhmel (2010 S. 82 f.) einen Einfluss der Fahrzeugvariante auf die probandenindividuelle statische Fahrhaltung nachweisen. Wie im Feldversuch von Scholly (2002 S. 26 f.) gezeigt wurde, ist die dynamische Augpunktlage und das Blickverhalten im Pkw von den



---

Sichteinschränkungen abhängig. Friedrichsen (2013 S. 48) zeigt einen Einfluss der Lkw-Fahrzeugvariante auf die mittleren statischen Augpunktlage. Die Abhängigkeit der dynamischen Augpunktlagenverteilung von der Fahrzeugvariante soll durch die Analyse der während dynamischer Sichtsituationen im Lkw aufgezeichneten Augpunktlagen untersucht werden:

**Hypothese 5:** Die dynamischen Augpunktlagenverteilungen verschiedener Fahrzeugvarianten unterscheiden sich. (H5)

In Kapitel 1.1.4 wurden die zur Erfüllung der Fahraufgabe während einer Sichtsituation notwendigen Sichtbereiche und die vom Fahrer initiierten Kopfbewegungen beschrieben. Die innerhalb der Fahraufgabe zu durchfahrenden Verkehrssituationen können nach unterschiedlichen Kriterien klassifiziert werden (vgl. Schweigert 2002 S. 19 ff.). Die Faktorstufen der Sichtsituation sind in Kapitel 3.1.4 definiert. Je Fahrstreckenkategorie kann zwischen sog. Baseline-Sichtsituationen und Szenarien mit hoher Komplexität unterschieden werden. Da bei den betrachteten Nutzfahrzeugvarianten die Spurhaltung bei Fahrtrichtungsänderungen, wie sie bei komplexen Sichtsituationen vorkommen, kontrolliert werden muss, wird angenommen, dass die Häufigkeit der Spiegelsicht von der Komplexität der dynamischen Sichtsituationen abhängt:

**Hypothese 6:** Bei komplexen Sichtsituationen wird häufiger als bei Baseline-Sichtsituationen in die Spiegel geblickt. (H6)

Zaindl (2014 S. 2) berichtet von ausgeprägten Kompensationsbewegungen der Augpunktlage in Fahrzeuginnenraumrichtung beim Blick in die Hauptspiegel eines Lkws. Die dynamische Kopfbewegung wird vom Fahrer zur Verschiebung des dargestellten Sichtbereichs eines konventionellen Spiegelsystems eingesetzt. Dadurch können in komplexen Sichtsituationen Sichtziele außerhalb des üblichen Sichtbereichs der indirekten Sicht erschlossen werden (vgl. Bothe et al. 2012a S. 1637 f.). Es wird vermutet, dass die Komplexität der Sichtsituation einen Einfluss auf die mittlere Augpunktlage der Fahrer hat. Dieser Zusammenhang soll zunächst an unterschiedlich komplexen Sichtsituationen einer Fahrstreckenkategorie untersucht werden. Hier bietet sich die Überlandfahrt an, da sowohl Situationen mit gestreckter Zugkombination als auch Situationen mit großen Knickwinkeln auftreten. Für die Sichtsituationen der Überlandfahrt wird folgende gerichtete Unterschiedshypothese formuliert:

**Hypothese 7:** Die dynamischen Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen liegen in Fahrzeuginnenraumrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen bei Baseline-Sichtsituationen. (H7)

Um neben den untersuchten Sichtsituationen auf der Landstraße auch die weiteren Sichtsituationen in der Stadt- und auf der Autobahn mit in die Betrachtungen einzubeziehen, werden nun jeweils eine komplexe Sichtsituation aller drei Fahrstreckenkategorien miteinander verglichen. Im Stadtverkehr treten im Vergleich zur Autobahnfahrt häufiger Fahrtrichtungsänderungen mit größeren maximalen Knickwinkeln auf. Es wird daher folgende gerichtete Unterschiedshypothese aufgestellt:

**Hypothese 8:** Die dynamischen Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen während der Stadt- oder Überlandfahrt liegen in Fahrzeuginnenraumrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen, während der Autobahnfahrt. (H8)

Die fahrerindividuelle Verteilung der dynamischen Augpunktlagen soll mit dem Maß der Streubreite beschrieben werden. Die Streubreite gibt nun den probandenindividuellen Mittelwert der dynamischen Positionsabweichung zum Mittelwert des Probanden an. Die Abhängigkeit der Streubreite soll zunächst an den Überlandsituationen untersucht werden. Es wird die folgende Hypothese aufgestellt:

**Hypothese 9:** Die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen ist größer als die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei Baseline-Sichtsituationen. (H9)

Auch die Streubreite soll neben den Landstraßensituationen bei Stadt- und Autobahnfahrt betrachtet werden. Da bei Sichtsituationen mit hoher Komplexität eine große Streubreite vermutet wird, ist die folgende Hypothese zu formulieren:

**Hypothese 10:** Die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen während der Stadt- oder Überlandfahrt ist größer als die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen, während der Autobahnfahrt. (H10)

---

#### 2.4.2 Fahrzeugzustandsparameter zur Beschreibung des dyn. Sichtverhaltens

---

Die automatisierte Regelung der innerhalb der dynamischen Sichtsituationen dargestellten Sichtbereiche eines Kamera-Monitor-Systems (KMS) soll über Fahrzeugparameter gesteuert werden (vgl. Kapitel 2.2.5). Insbesondere werden hier die Parameter des Knickwinkels und der Fahrzeuggeschwindigkeit vorgeschlagen (Bothe et al. 2013e S. 9, Huber et al. 2014 S. 13 f.). Daher ist von besonderem Interesse, ob die einzelnen Sichtsituationen durch diese Fahrzeugzustandsparameter differenziert werden können.

In Kapitel 1.1.4 und Kapitel 2.3.3 wurde die starke Abhängigkeit des für den Fahrer zur Durchführung der Sichtsituation notwendigen dynamischen Sichtbereichs vom Knickwinkel zwischen Zugmaschine und Auflieger gezeigt (vgl. Bothe et al. 2013b S. 298 ff., Zaindl et al. 2013 S. 3 ff.). Da der Fahrer in komplexen Situationen mit großen Fahrtrichtungsänderungen die Spurhaltung seines Aufliegers überwachen muss, werden die hintere Kante und die Räder des geknickten Anhängers zu Sichtzielen. Zur Differenzierung der Sichtsituationen anhand der Knickwinkelverteilung sind nicht die Medianwerte sondern die maximal auftretenden Knickwinkel heranzuziehen. Daher wird folgende Hypothese aufgestellt:

**Hypothese 11:** Sichtsituationen lassen sich anhand der maximal auftretenden Knickwinkel differenzieren. (H11)

Die Sichtsituationen beschreiben aufgrund ihrer Fahrstreckenzusammensetzung von den Abbiege- manövern in der Stadt bis zu den Überholmanövern auf der Autobahn das gesamte mit einem Nutzfahrzeug abrufbare Fahrzeuggeschwindigkeitsintervall von 0 bis 90 km/h. Daher soll untersucht werden, ob die Sichtsituationen auch über die jeweilige Geschwindigkeitsverteilung separiert werden können. Es wird folgende Hypothese formuliert:

**Hypothese 12:** Sichtsituationen lassen sich anhand ihrer Geschwindigkeitsverteilung differenzieren. (H12)

Um das mentale Modell (vgl. Hakuli et al. 2012 S. 641), das sich der Fahrer vom Systemverhalten eines KMS aufbauen muss so einfach wie möglich zu halten, soll die Anzahl der Systemparameter zur Steuerung des Verschiebealgorithmus auf ein Minimum reduziert werden. Dazu wird der Zusammenhang zwischen den beiden Fahrzeugparametern im realen Nutzungsverhalten untersucht und es wird die folgenden Hypothese aufgestellt:

**Hypothese 13:** Bei der Nutzung von Fernverkehrsfahrzeugen im realen Straßenverkehr kann ein Zusammenhang zwischen den maximal auftretenden Knickwinkeln und der Geschwindigkeit festgestellt werden. (H13)

Um die Auswirkungen der Fahrzeugparameter auf die Augpunktlagenverteilung während dynamischer Sichtsituationen genauer zu betrachten, ist eine Untersuchung dieser Zusammenhänge notwendig. In Hypothese 8 wurde vermutet, dass bei komplexen Sichtsituationen die mittlere dynamische Augpunktlage im Vergleich zur Position bei Baseline-Sichtsituationen in Fahrzeughfahrtrichtung weiter vorne liegt. Komplexe Fahrsituationen mit großen Fahrtrichtungsänderungen können nur bei niedrigen Geschwindigkeiten durchgeführt werden. Daher wird folgende Hypothese aufgestellt:

**Hypothese 14:** Die dynamischen Augpunktlagen bei niedrigen Geschwindigkeiten liegen in Fahrzeughfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen bei hohen Geschwindigkeiten. (H14)

Zaindl (2014 S. 2) berichtet von ausgeprägten Kompensationsbewegungen der Augpunktlage in Fahrzeughlängsrichtung zur Verfolgung der hinteren Aufliegerkante bei großen Knickwinkeln. Diese Bewegungsrichtung ist nachvollziehbar, da sie durch den Bewegungsapparat des Menschen ermöglicht wird und die Bewegungsbahn in Fahrzeughlängsrichtung nicht durch Fahrzeugkomponenten eingeschränkt ist. In Fahrzeugquerrichtung wird der Bewegungsraum durch die Seitenscheibe begrenzt. Eine Kopfbewegung in Fahrzeughochrichtung hat keinen positiven Effekt auf die vom Fahrer initiierte Anpassung der im Spiegel dargestellten Sichtbereiche bei großen Knickwinkeln (vgl. Kapitel 2.3.3). Daher wird die gezielte Kopfbewegung in x-Richtung betrachtet:

**Hypothese 15:** Die dynamischen Augpunktlagen bei großen Knickwinkeln liegen in Fahrzeughfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen bei kleinen Knickwinkeln. (H15)

---

### 2.4.3 Dynamische Sichtbereiche der indirekten Sicht

---

Über die Messung der dynamischen Augpunktlagen und der zugehörigen Sichtstrahlorientierungen (vgl. Kapitel 2.3.2) können dynamische Sichtkegel der fovealen Sicht (vgl. Kapitel 2.1.2) bestimmt werden. Durch Reflektion dieser Sichtkegel an den Spiegelflächen werden dynamische Bereiche der indirekten Sicht abgeleitet (vgl. Kapitel 2.3.3). Die vom Fahrer in dynamischen Sichtsituationen genutzten Sichtbereiche können somit bestimmt werden.

Die Abhängigkeit der dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht von der Sichtsituation kann untersucht werden. Die Breite des genutzten Knickwinkelbereichs beschreibt während welchen Knickwinkeln der Spiegel verwendet wird. Es wird vermutet, dass die Sichtsituation einen Einfluss auf die Breite des Knickwinkelbereichs hat. Daher wird folgende Unterschiedshypothese aufgestellt.

**Hypothese 16:** Die dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht verschiedener Sichtsituationen unterscheiden sich durch die Breite des genutzten Knickwinkelbereiches. (H16)

Der genutzte horizontale Sichtbereich, der durch den inneren und äußeren FOV-Winkel (vgl. Glossar) begrenzt wird, kann für jede Abstufung des genutzten Knickwinkelbereichs bestimmt werden. Somit wird ein Verlauf des dynamischen Sichtbereichs über dem Knickwinkel definiert. In Kapitel 1.1.4 und Kapitel 2.3.3 wurde die starke Abhängigkeit des für den Fahrer zur Durchführung der Sichtsituation notwendigen dynamischen Sichtbereichs vom Knickwinkel zwischen Zugmaschine und Auflieger gezeigt (vgl. Bothe et al. 2013b S. 298 ff., Zaindl et al. 2013 S. 3 ff.). Da der Fahrer in komplexen Situationen mit großen Fahrtrichtungsänderungen die Spurhaltung seines Aufliegers überwachen muss, werden die hintere Kante und die Räder des geknickten Anhängers zu Sichtzielen. Es wurde beobachtet, dass der Fahrer in diesen Situationen durch gezielte Kopfbewegungen den im Spiegel dargestellten Sichtbereich dynamisch diesen Sichtzielen anpasst. Daher wird angenommen, dass der Sichtbereichsverlauf situationsabhängig ist:

**Hypothese 17:** Der Verlauf dynamischer Sichtbereiche der indirekten Sicht verschiedener Sichtsituationen unterscheidet sich. (H17)

Um den Einfluss der Fahrzeugvariante auf die Verläufe der dynamischen Sichtbereiche zu untersuchen, sollen die Kennwerte des Referenz-Sattelzugs und eines Sattelzugs mit schmaler und niedrig aufgesetzter Kabine miteinander verglichen werden. Diese Fahrzeuge unterscheiden sich in den konstruktiven Abmessungen zwischen Auslegungsaugpunkt (ORP), Spiegelfläche und Fahrbahnoberfläche (vgl. ISO/FDIS 16505 2014 B.6.1). Die Zugzusammensetzung und damit das dynamische Verhalten des Aufliegers als Sichtziel unterscheiden sich nicht (vgl. Bothe et al. 2013b S. 298 ff., Zaindl et al. 2013 S. 3 ff.). Es werden unterschiedliche Verläufe der dynamischen Sichtbereiche erwartet:

**Hypothese 18:** Der Verlauf dynamischer Sichtbereiche der indirekten Sicht verschiedener Fahrzeugvarianten unterscheidet sich. (H18)

Da eine Abhängigkeit der Augpunktlage von der Körperhöhe der Probanden vermutet wird, sollte auch eine Abhängigkeit der dynamischen Sichtbereiche von der Körperhöhe betrachtet werden. Zaindl (2013 S. 2) berichtet, dass große Fahrer die Augpunktlagenveränderung und die dadurch resultierende Sichtbereichsverschiebung stärker als kleine Fahrer einbringen können. Dieser Aussage kann jedoch die Beobachtung entgegengesetzt werden, dass zur Erfüllung der fernverkehrstypischen Transportaufgabe (vgl. Kapitel 1.1.1) sich die Sichtziele außerhalb des Fahrzeugs (vgl. Kapitel 2.1.3) für unterschiedlich große Fahrer nicht unterscheiden. Zur Untersuchung dieses Sachverhalts wird der Einfluss der Körperhöhe auf den Verlauf der dynamischen Sichtbereiche betrachtet:

**Hypothese 19:** Der Verlauf dynamischer Sichtbereiche der indirekten Sicht verschiedener Körperhöhengruppen unterscheidet sich. (H19)

Die Datenbasis zur Untersuchung der aufgestellten Hypothesen, wird innerhalb des im folgenden Kapitel beschriebenen Probandenversuchs erhoben (vgl. Kapitel 3). Durch die Datenanalyse (vgl. Kapitel 4) wird die empirische Grundlage zur ergonomischen Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) erarbeitet und exemplarisch umgesetzt. Innerhalb der Diskussion der Ergebnisse (vgl. Kapitel 5) wird die Erfüllung der aufgestellten Hypothesen und die Ableitung der gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und bewertet.

---

## 3 Probandenversuch zur Erhebung der Rohdaten

---

### 3.1 Unabhängige Variablen

---

Um die in Kapitel 2.4 aufgestellten Hypothesen zu untersuchen wird ein Probandenversuch zur Erhebung der relevanten Sichtdaten durchgeführt. Hierbei liegt die Messung von Daten der dynamischen Sichtinteraktion zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umgebung während der Nutzung konventioneller Spiegelsysteme im Vordergrund. Die unabhängigen Variablen werden so gewählt, dass mit ihnen die aufgestellten Hypothesen untersucht werden können. Zur Überprüfung der Hypothesen 3 und 19 werden die Faktorstufen der Körperhöhe benötigt. Da sich die Population der Lkw-Fahrer von der Gesamtbevölkerung im anthropometrischen Merkmal des Taillenumfangs stark unterscheidet (vgl. Jürgens et al. 2000 S. 30), soll mit Hypothese 4 der Einfluss dieses Faktors auf die dynamische Augpunktlagenverteilung untersucht werden. In den Hypothesen 5 und 18 werden Abhängigkeiten der Sichtdaten von der Fahrzeugvariante vermutet. Zur Überprüfung der Hypothesen 6 bis 17 werden die Faktorstufen der Sichtsituation herangezogen. Die unabhängigen Variablen A bis D decken das Nutzungsverhalten der Lkw-Fahrerpopulation im Güterfernverkehr ab und können zur Analyse der dynamischen Sichtdaten systematisch variiert werden.

---

#### 3.1.1 Faktor A: Körperhöhe

---

In den statischen Augpunktlagenverteilungen, die von Fröhmel zur Validierung von menschenmodellbasierten Haltungssimulationen erhoben wurden (vgl. Kapitel 2.3.1; Fröhmel 2010 S. 82 f.), konnte in allen getesteten Fahrzeugvarianten ein Einfluss der Körperhöhe auf die Position des Probanden gezeigt werden. Kleine Personen sitzen verglichen mit großen Personen im Mittel tiefer und weiter vorne im Fahrzeug. Für Nutzfahrzeuge stellen Cook et al. (2011 S. 36) ebenfalls eine Abhängigkeit der vom Fahrer in der Kabine eingenommenen Fahrhaltung von dessen Körperhöhe fest und verwenden die beobachtete Augpunktlagenverteilung als Grundlage zur Bestimmung der Spiegelsichtbereiche (vgl. Kapitel 2.3.3). Aufgrund der konzeptbedingten Auslegung europäischer Fernverkehrsfahrzeuge (vgl. Kapitel 1.1.1 & Kapitel 2.1.3) ist die Variation in Fahrzeuglängsrichtung im Vergleich zum Pkw weniger ausgeprägt. Die Körperhöhe hat vielmehr einen Einfluss auf die Augpunktlage in Fahrzeughochrichtung. Die Augpunkte kleiner Lkw-Fahrer liegen im Fahrerhaus tiefer als die Augpunkte große Fahrer (vgl. Cook et al. 2011 S. 36).

Die Körperhöhe ist laut Jürgens (1999 B-1.2.1) als „vertikale Distanz von der Standfläche bis zum höchsten Punkt des Kopfes (Vertex)“ definiert. Sie ist das wichtigste und bekannteste ergonomische Leitmaß und wird zur anthropometrischen Beschreibung von Populationen (vgl. Jürgens 1989b S. 1; Jürgens 1999 B-1.2; Jürgens et al. 2000 S. 30; Speyer 2012 S. 1 ff.) und der kundengruppenbezogenen Definition von Testkollektiven (vgl. Speyer 2005 S. 1 ff.; Human Solutions 2012 K. 5 & 6) eingesetzt. Digitale Menschenmodelle, die über die Körperhöhe separiert werden können, werden innerhalb des gesamten ergonomischen Absicherungsprozesses von Straßenfahrzeugen eingesetzt (vgl. Kapitel 2.2.1; Wagner 2007, S. 2 ff.; Bothe 2010b S. 30 ff.).

Die Personengruppe der Lkw-Fahrer unterscheidet sich aufgrund von Merkmalen, wie der Geschlechtsverteilung innerhalb der Berufsgruppe (Jürgens et al. 2000 S. 1), in den für ergonomische Auslegung relevanten Aspekten von der Gesamtbevölkerung. So wurden in Deutschland nur 3% der personenindividuellen Fahrerkarten, die zum gewerblichen Betrieb von Nutzfahrzeugen vorgeschrieben sind (vgl. BMVBW 2005 § 5), an Fahrerrinnen ausgegeben. Im Unterschied zum Pkw, bei dem eine gleichgewichtete Verteilung zwischen weiblichen und männlichen Kunden angesetzt wird, ist beim Lkw der Einfluss der Fahrerrinnen auf die gesamte Körperhöhenverteilung verschwindend gering. Daher wird in dieser Untersuchung die Körperhöhe ausschließlich auf Erhebungen von männlichen Populationen bezogen (vgl. Jürgens et al. 2000 S. 1; Bothe et al. 2013a S. 442).

Um innerhalb einer Untersuchung fundierte Aussagen zur ergonomischen Auslegung von Fahrzeugen leisten zu können, müssen die Versuchsteilnehmer das gesamte Spektrum der Körperhöhen, vom 5. (P05), über das 50. (P50) bis zum 95. Perzentil (P95), abdecken (vgl. Speyer 2005 S. 19). In Abbildung 3-1 sind die körperhöhenbezogenen Rand- und das Mittel-Perzentil des Lkw-Fahrer-Probandenkollektivs visualisiert (vgl. Bothe et al. 2012a S. 1641).

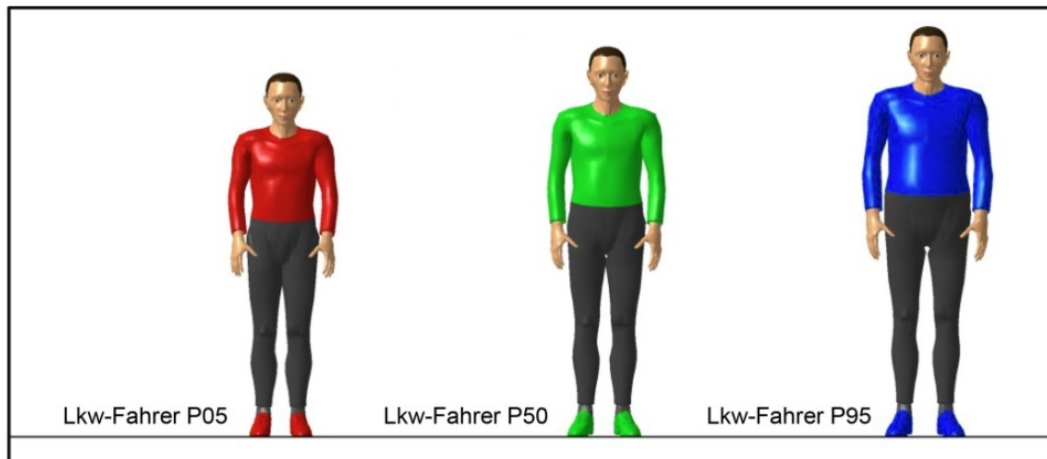


Abbildung 3-1: Lkw-Fahrer-Probandenkollektiv zur Untersuchung des Einflusses der Körperhöhe (Bothe et al. 2012a S. 1641)

Die Perzentilwerte beziehen sich immer auf eine auslegungsorientiert definierte Teilmenge der Gesamtbevölkerung. Innerhalb dieser Arbeit wird die Population der männlichen deutschen Lkw-Fahrer betrachtet (vgl. Bothe et al. 2013a S. 442). Die verwendeten Perzentilwerte beziehen sich auf die, während einer Reihenummessung im Jahr 2000 erhobenen, anthropometrischen Kennwerte von 495 Lkw-Fahrern (vgl. Jürgens et al. 2000 S. 30). In Abbildung 3-2 sind zum Vergleich der Lkw-Fahrer-Teilmenge Körperhöhenverteilungen weiterer deutscher Populationen dargestellt.

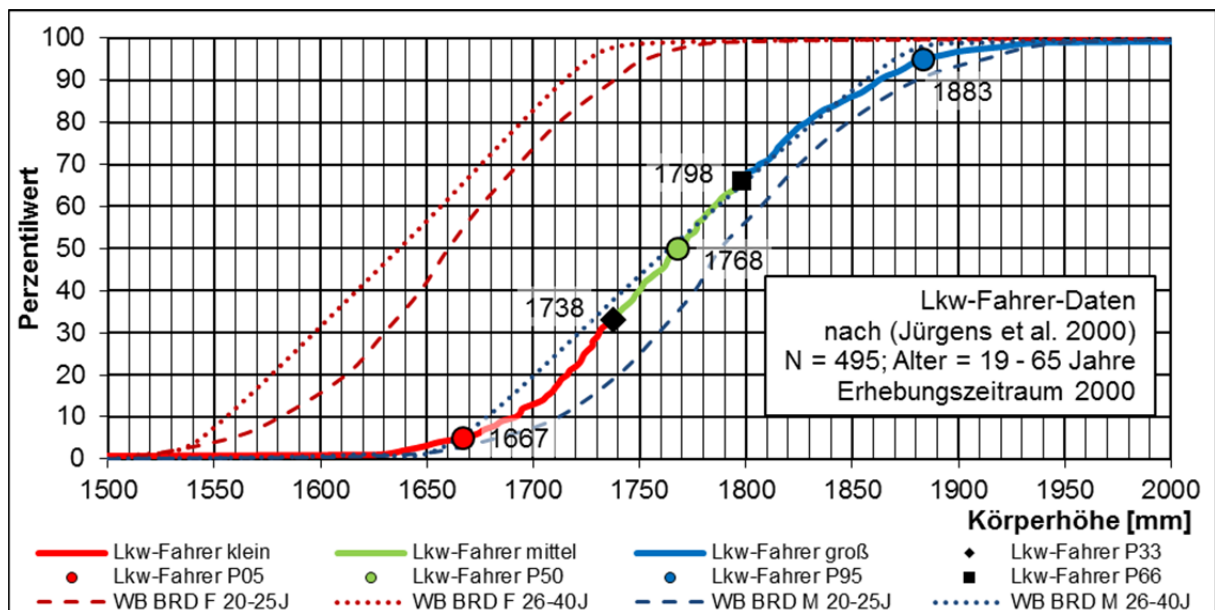


Abbildung 3-2: Körperhöhenverteilungen deutscher Populationen (e. D. n. Jürgens 1999 B-1.2; Jürgens et al. 2000 S. 30)

Die Faktorstufen der Körperhöhe (KH) werden durch die Körperhöhengruppen (KHG) mit den Trennwerten des 33. und des 66. Perzentils (bzgl. Jürgens et al. 2000 S. 30) festgelegt. Das Gesamtspektrum teilt sich damit in die Gruppen der kleinen Personen ( $KH \leq 1738$  mm), der mittelgroßen Personen ( $1738 \text{ mm} < KH \leq 1798$  mm) und der großen Personen ( $KH > 1798$  mm) auf.

### 3.1.2 Faktor B: Taillenumfang

Zur Festlegung eines repräsentativen Fahrttestkollektivs müssen neben der Körperhöhe auch die Stammlänge und der Taillenumfang als weitere ergonomische Leitmaße beachtet werden (vgl. Speyer 2005 S. 6 ff.; Human Solutions 2012 K. 6). Die Stammlänge, definiert als „vertikale Distanz von der Sitzfläche bis zum höchsten Punkt des Kopfes (Vertex)“ (Jürgens 1999 B-1.2.31) beschreibt in



Kombination mit der Körperhöhe die Proportion des Menschen (vgl. Jürgens 1989b S. 2). In Abbildung 3-3 sind die Stammlängenverteilungen deutscher Populationen dargestellt. Die Verteilung der Lkw-Fahrer unterscheidet sich nicht wesentlich von der Gesamtbevölkerung. Zur Eingrenzung des Untersuchungsumfangs wird innerhalb dieser Arbeit, die Stammlänge nicht als Faktor betrachtet sondern ausschließlich als Beschreibungsvariable der Stichprobe eingesetzt.

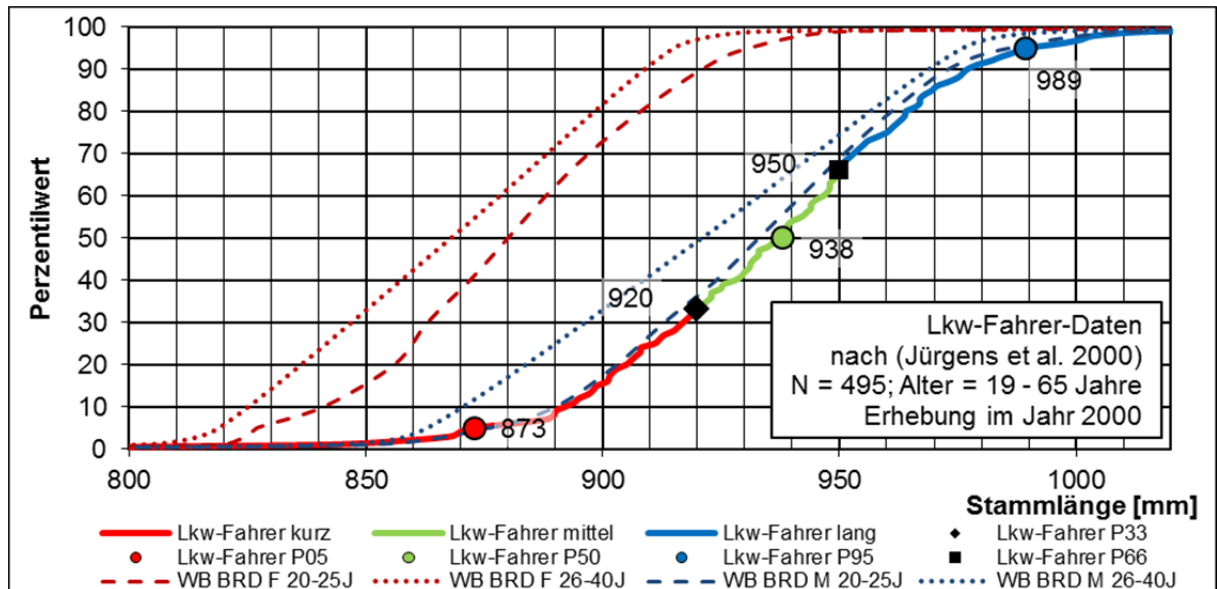


Abbildung 3-3: Stammlängenverteilungen deutscher Populationen (e. D. n. Jürgens 1999 B-1.2; Jürgens et al. 2000 S. 31)

Der Taillenumfang, definiert als „kleinster horizontaler Umfang des Abdomen in Höhe der am meisten eingezogenen Punkte der Seitenkontur des Körpers zwischen Rippenbogen und Darmbeinkamm“ (Jürgens 1999 B-1.2.80) ist ein Maß zur Beschreibung der Korpulenz. Die Population der Lkw-Fahrer unterscheidet sich im Taillenumfang stark von der männlichen deutschen Bevölkerung (vgl. Abbildung 3-4). In dieser Arbeit wird daher die Augpunktlagenverteilung in Abhängigkeit vom Taillenumfang betrachtet. Die Faktorstufen des Taillenumfangs (TU) werden durch die Körpermaßgruppen (KMG) mit den Trennwerten des 33. und des 66. Perzentils (bzgl. Jürgens et al. 2000 S. 31) festgelegt. Es entstehen damit die Gruppen der schlanken Personen ( $TU \leq 931$  mm), der mittelkorpulenten Personen ( $931 \text{ mm} < TU \leq 1032$  mm) und der korpulenten Personen ( $TU > 1032$  mm).

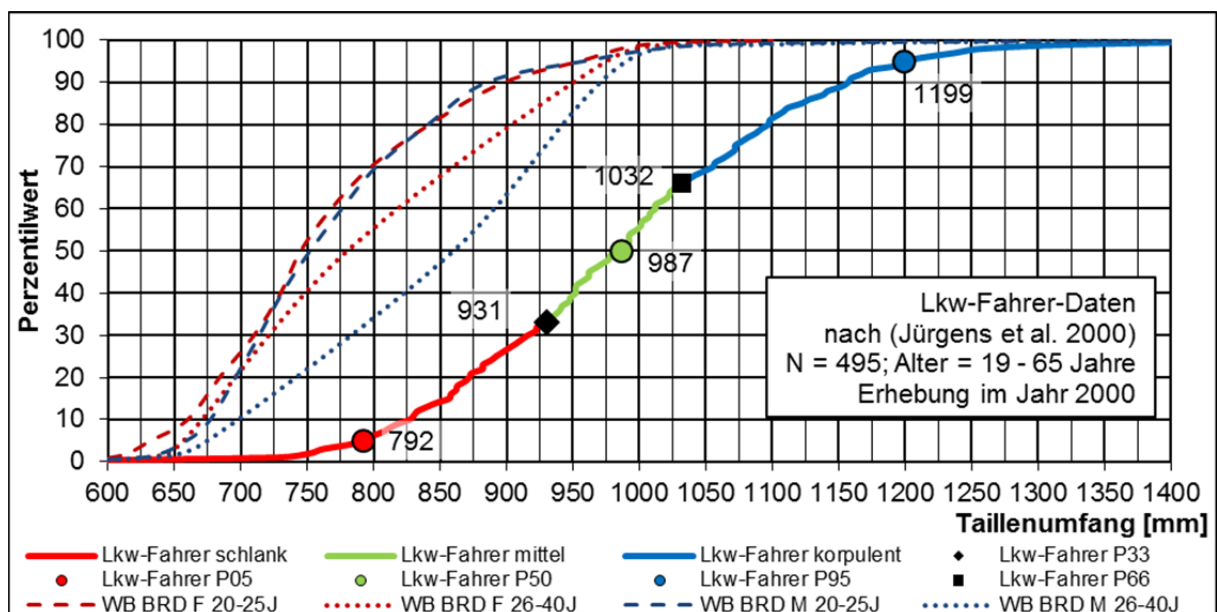


Abbildung 3-4: Taillenumfangsverteilungen deutscher Populationen (e. D. n. Jürgens 1999 B-1.2; Jürgens et al. 2000 S. 31)

### 3.1.3 Faktor C: Fahrzeugvariante

Von Fröhmel (2010 S. 82 f.) wurde eine Abhängigkeit der statischen Augpunktlagenverteilung von der Fahrzeugvariante gezeigt (vgl. Kapitel 2.3.1). Der Einfluss von fahrzeugseitigen Sichtverdeckungen auf die Verteilung dynamischer Augpunktlagen konnte von Scholly (2002 S. 26 f.) nachgewiesen werden (vgl. Kapitel 2.3.2). Die Sichtbereiche der direkten und indirekten Sicht hängen stark von der Kabinenvariante und der Augpunktlage über der Fahrbahn ab (vgl. Kapitel 2.1.3 & 2.3.3; Cook et al. 2011 S. 38 ff.). Die Fahrzeugvariante wurde daher als Faktor für diesen Versuch gewählt.

Schwere Nutzfahrzeuge können durch ihre Zugzusammensetzung und die Fahrerhausvariante differenziert werden. Im europäischen Fernverkehr werden fast ausschließlich Sattel- und Gliederzugkombinationen eingesetzt (vgl. Braun & Kolb 2008 S. 31 ff.; Brähler 2010 S. 111 ff.; Shell 2010 S. 19 f.). Typische Fahrerhausvarianten für diesen Einsatzzweck sind in Abbildung 3-5 dargestellt (vgl. Daimler 2011a S. 56 ff.).



Abbildung 3-5: Fahrerhausvarianten für den Einsatz im schweren Güterfernverkehr (e. D. nach Daimler 2011a S. 3)

Die drei in Abbildung 3-5 gezeigten Kabinenvarianten unterscheiden sich in der Fahrerhausbreite. Das linke und das mittlere Fahrzeug sind mit einem schmalen, das rechte Fahrzeug mit einem breiten Fahrerhaus ausgestattet. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Aufsetzhöhe. Beim linken Fahrzeug ist die Kabine niedrig, beim mittleren und rechten Fahrzeug hoch auf dem Rahmen aufgesetzt. Das breite Fahrerhaus, das für die weiteren Betrachtungen als Referenz herangezogen wird, misst in Fahrzeugquerrichtung 2500 mm das schmale 2300 mm (vgl. Abbildung 3-6). Die A-Säulen des schmalen Fahrerhauses sind um 100 mm zur Fahrzeugmittelebene hin versetzt. Die Spiegel bleiben, da sie die Sicht am 2550 mm breiten Auflieger vorbei bereitstellen müssen, auf der gleichen y-Position. Der Sitzreferenzpunkt (SgRP) und die damit verbundene Sitzmittelebene wandert um lediglich 80 mm in y-Richtung zur Fahrzeugmittelebene. Somit unterscheiden sich das breite und das schmale Fahrerhaus in ihrer konzeptbedingten Anordnung der sichtrelevanten Komponenten (Spiegel, A-Säulen und Sitz).

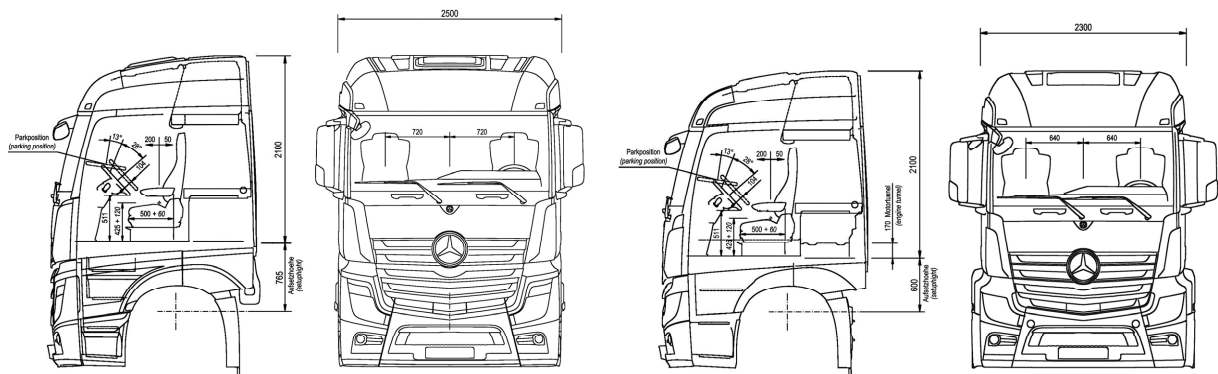


Abbildung 3-6: Breites und hoch aufgesetztes Fahrerhaus (links) schmales und niedrig aufgesetztes Fahrerhaus (rechts) (e. D. nach Daimler 2011a S. 56 f.)

---

Die Aufsetzhöhe hat einen direkten Einfluss auf die Augpunktlage über der Fahrbahnebene (vgl. Abbildung 3-6). Im Fernverkehr werden vornehmlich Fahrzeuge mit einer Aufsetzhöhe von 765 mm oder 600 mm eingesetzt (vgl. Daimler 2011a S. 56 ff.). Breite und hoch aufgesetzte Fahrerhäuser bieten viel Stauraum sowie einen ebenen Fahrerhausboden und sind daher im Langstreckeneinsatz stark verbreitet. Dadurch werden sie auch in dieser Untersuchung präferiert. Es kommt der in Abbildung 3-7 abgebildete Gliederzug mit breiter und hoch aufgesetzter Kabinenvariante als Versuchsfahrzeug V1 zum Einsatz. Die Gliederzugkombination besteht aus einem dreiachsigen Zugfahrzeug mit Kofferaufbau und einem zweiachsigen Anhänger.

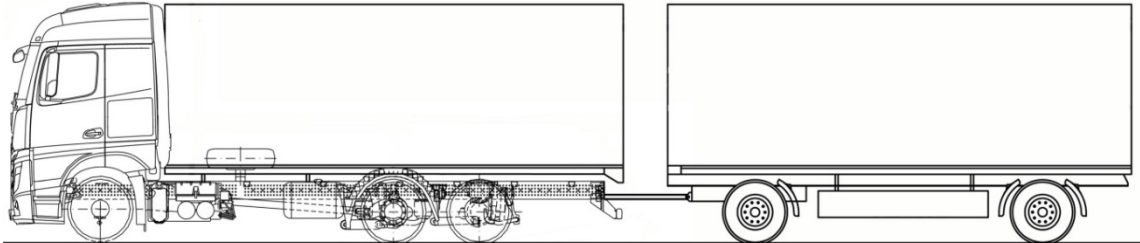


Abbildung 3-7: Versuchsfahrzeug V1: Gliederzugkombination mit breitem und hoch aufgesetztem Fahrerhaus (e. D. nach Daimler 2011a S. 56; Isella 2012 S. 50)

Das Versuchsfahrzeug V2 (vgl. Abbildung 3-8) hat die gleiche Fahrerhausvariante wie V1, setzt sich jedoch aus einer zweiachsigen Sattelzugmaschine und einem dreiachsigen Auflieger zusammen. Die Fahrzeugvariante V2 ist im europäischen Fernverkehrseinsatz am weitesten verbreitet (Shell 2010 S. 19 f.). Sie wird daher innerhalb der Untersuchung als Referenz-Fahrzeug herangezogen.

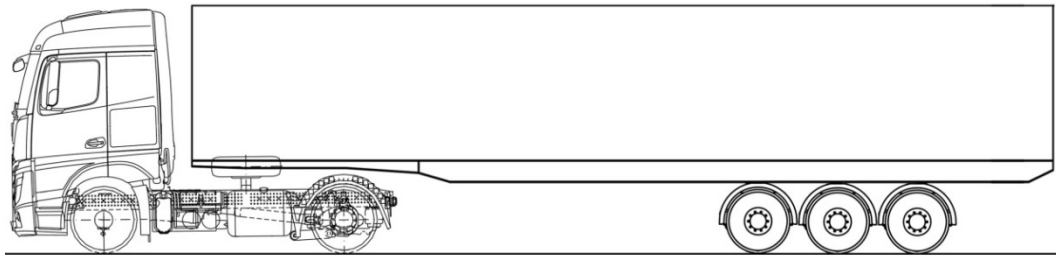


Abbildung 3-8: Versuchsfahrzeug V2: Sattelzugkombination mit breitem und hoch aufgesetztem Fahrerhaus (e. D. nach Daimler 2011a S. 56; Isella 2012 S. 50)

Das Versuchsfahrzeug V3 (vgl. Abbildung 3-9) hat die gleiche Zugzusammensetzung wie V2, die Sattelzugmaschinen hat jedoch ein schmales und niedrig aufgesetztes Fahrerhaus.

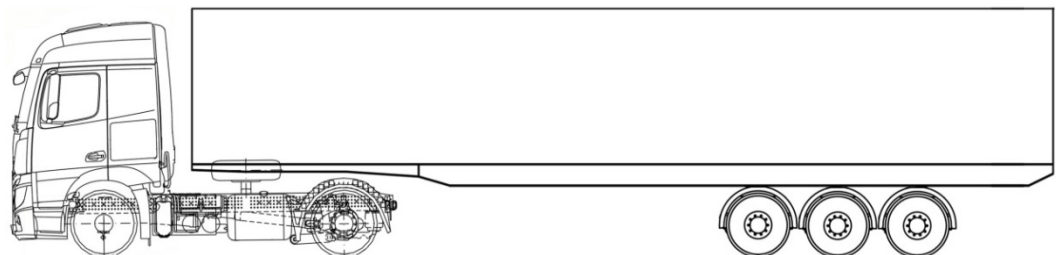


Abbildung 3-9: Versuchsfahrzeug V3: Sattelzugkombination mit schmalem und niedrig aufgesetztem Fahrerhaus (e. D. nach Daimler 2011a S. 57; Isella 2012 S. 51)

Damit unterscheiden sich die Faktorstufen V1 und V2 ausschließlich in der Zugzusammensetzung, die aufgrund der unterschiedlichen Längsabmessungen und Achsanordnungen die Fahrdynamik beeinflusst. Das Auflieger- oder Anhängerverhalten führt innerhalb dynamischer Fahrsituationen zu verschiedenen Sichtverdeckungen und Sichtzielanforderungen (vgl. Kapitel 2.1.3; ISO/FDIS 16505 2014 S. 107). Versuchsfahrzeug V2 und V3 unterscheiden sich lediglich in der Kabinenvariante, die durch die unterschiedliche Augpunktlagenhöhe über der Fahrbahnoberfläche und den differenten Abhängigkeitsverhältnissen des optisch gekoppelten Spiegelsystems (Augpunkt-Spiegel-Sichtziel) die Sichtbedingungen unterschiedlich beeinträchtigt (vgl. Kapitel 2.1.3 & 2.3.3; Cook et al. 2011 S.38 ff.). Die Fahrzeuge V1 bis V3 decken somit die gesamte fernverkehrsübliche Spannweite der die Sicht beeinflussenden Fahrzeugkennwerte ab.

### 3.1.4 Faktor D: Sichtsituation

In der Untersuchung von Scholly (2002 S. 26 ff.) konnte ein Einfluss der Sichtsituation auf die dynamischen Augpunktlagen- und Sichtstrahlverteilungen nachgewiesen werden (vgl. Kapitel 2.3.2). Auch Woyna (2013 S. 157) weist für seinen Versuch sichtsituationsabhängige Blickdichteverteilungen der direkten Sicht aus. Fahrsituationen können anhand von Kategorien, wie dem Straßentyp oder der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern, eindeutig klassifiziert (vgl. Fastenmeier 1995 S. 44 ff.; Schweigert 2002 S. 19 ff.; Isella 2012 S. 56 f.) und mittels der visuellen Komplexität differenziert werden (Bothe et al. 2013a S. 443; Bothe et al. 2013b S. 295). In dieser Arbeit werden ausgewählte Sichtsituationen, die die Transportaufgabe des Fernverkehrs-Lkws repräsentieren, als Faktorstufen herangezogen. Innerhalb der ISO 16505 werden kritische Anwendungsfälle (UCs) eines Kamera-Monitor-Systems (KMS) zusammengestellt (vgl. ISO/FDIS 16505 2014 S. 40 ff. & 125 ff.). Da die ISO 16505 den veröffentlichten Stand des Wissens zur Auslegung von KMS darstellt, werden die in dieser Arbeit verwendeten Sichtsituationen aus den im Standard beschriebenen Anwendungsfällen (vgl. Tabelle 3-1) abgeleitet und die Plausibilität der Definition anhand relevanter Datenerhebungen überprüft.

Tabelle 3-1: Kritische Anwendungsfälle (UC) v. KMS (n. ISO/FDIS 16505 2014 S. 40 ff. & 125 ff.)

<b>Titel</b>	<b>Beschreibung der Sichtsituation (nach ISO)</b>	<b>Begründung der Kritikalität (nach ISO)</b>
UC1 Ortsdurchfahrt	Überwachung potentiell kritischer Objekte im erweiterten Sichtbereich bei der Fahrt durch urbane Infrastruktur	Bei konventionellen Spiegelsystemen wird in dieser Situation der dargestellte Sichtbereich durch Kopfbewegungen des Fahrers verschoben.
UC2 Abbiegen	Überwachung potentiell kritischer Objekte und des eigenen Fahrzeugs im erweiterten Sichtbereich vor und beim Abbiegevorgang	Bei konventionellen Spiegelsystemen wird in dieser Situation der dargestellte Sichtbereich durch Kopfbewegungen des Fahrers verschoben.
UC3 Rückwärtsfahrt	Überwachung potentiell kritischer Objekte und des eigenen Fahrzeugs im erweiterten Sichtbereich bei Rückwärtsfahrt	Bei konventionellen Spiegelsystemen wird in dieser Situation der dargestellte Sichtbereich durch Kopfbewegungen des Fahrers verschoben.
UC4 Rangierfahrt	Überwachung potentiell kritischer Objekte und des eigenen Fahrzeugs im erweiterten Sichtbereich bei Rückwärtsfahrt zu einer exakten Position (z. B. Rampenanfahrt)	Bei konventionellen Spiegelsystemen wird in dieser Situation der dargestellte Sichtbereich durch Kopfbewegungen des Fahrers verschoben.
UC5 Kreisverkehr	Beobachtung des Aufliegers und der Fahrzeugumgebung bei kontinuierlich verändertem Sichtbereich während der Kreisverkehrsdurchfahrt	Bei konventionellen Spiegelsystemen wird in dieser Situation der dargestellte Sichtbereich durch Kopfbewegungen des Fahrers verschoben.
UC6 Auffahrt auf Fahrstreifen unter Winkel	Auffahrt auf vorfahrtsberechtigten Fahrstreifen unter einem spitzen Winkel z. B. in Kreuzungssituationen oder bei Autobahnauffahrten ohne Beschleunigungsstreifen	Bei konventionellen Spiegelsystemen wird in dieser Situation der dargestellte Sichtbereich durch Kopfbewegungen des Fahrers verschoben.
UC7 Autobahnfahrt	Überwachung des rückwertigen Verkehrs bei monotonen Langzeitfahrten auf der Autobahn	Langzeitnutzung von Spiegelsystemen und Erkennung sowie Einschätzung von weit entfernten Objekten mit großer Relativgeschwindigkeit.
UC8 Spurwechsel	Spurwechsel mit anderen Verkehrsteilnehmern im direkten Fahrzeugumfeld oder schnell herannahendem rückwertigen Verkehr	Konventionelle Spiegelsysteme decken einen größeren Sichtbereich als die nach ECE-R 46 geforderten Sichtfelder ab.

Die beschriebenen Anwendungsfälle können in drei Kategorien von Sichtsituationen zusammengefasst werden. Aus UC1 bis UC4 werden die Sichtsituationen S01 bis S04 abgeleitet und in der Kategorie der Stadt- und Rangier-Sichtsituationen zusammengefasst (vgl. Abbildung 3-10; Bothe et al. 2012a S. 1642 ff.). S01 beschreibt dabei die Ortsdurchfahrt auf einer vorfahrts-



berechtigten Durchgangsstraße. Der Fahrer fährt auf der rechten Spur mit angemessener Geschwindigkeit und ausreichendem Sicherheitsabstand (Isella 2012 S. 58). Da die Sichtsituation S01 innerhalb dieser Kategorie die niedrigste Kritikalität aufweist, wird sie als Baseline-Sichtsituation bezeichnet und kann während der Analyse als Referenz für andere Situationen herangezogen werden. S02 beschreibt das Rechtsabbiegen an einer Ampelkreuzung (vgl. Abbildung 3-10). Der Lkw-Fahrer stoppt das Fahrzeug bei rotem Lichtsignal an der Haltelinie der Kreuzung, die aus sich rechtwinklig kreuzenden Straßen aufgebaut ist (vgl. Isella 2012 S. 58). Nach Detektion des grünen Lichtsignals durch die direkte Sicht wechselt der Fahrer zur indirekten Sicht und überprüft vor und während des Abbiegevorgangs das direkte Umfeld und das Fahrverhalten seiner Fahrzeugkombination innerhalb der Verkehrsinfrastruktur. Der Fahrer beschleunigt das Fahrzeug und führt den Fahrtrichtungswechsel durch. Schon anhand der Änderung des längs- und querdynamischen Verhaltens des Nutzfahrzeugs kann ein Unterschied zur Sichtsituation S01 festgestellt werden.

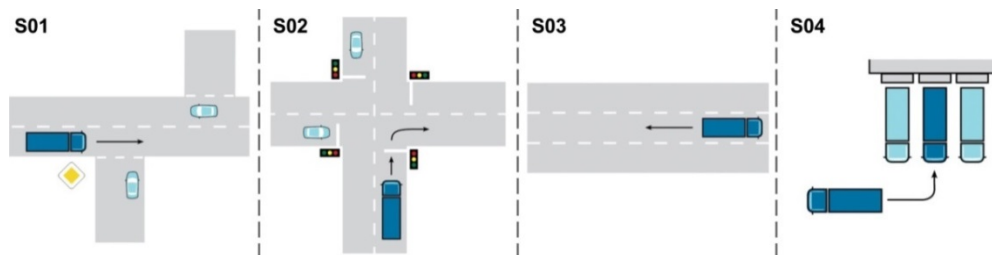


Abbildung 3-10: Stadt- und Rangier-Sichtsituationen (e. D. n. Isella 2012 S. 59 f.)

Rückwärts- und Rangierfahrten sind ein wichtiger Bestandteil der Transportaufgabe des Nutzfahrzeugs (vgl. Kapitel 1.1.1) und werden von der ISO 16505 als kritische Anwendungsfälle eingestuft (vgl. ISO/FDIS 16505 2014 S. 43 & 125). Aus UC3 wird die Sichtsituation S03 abgeleitet. Sie beschreibt das gerade Zurückschieben eines Anhängers oder Aufliegers. Dabei muss das Fahrzeugumfeld aufgrund der erheblichen Sichtverdeckungen (vgl. Kapitel 2.1.3) vorausschauend überprüft und der Geradeauslauf des Anhängers kontrolliert und korrigiert werden. Bei der aus UC4 abgeleiteten und in S04 beschriebenen Rampenanfahrt über rechts, sind die Anforderungen an den Fahrer nochmals verschärft. In dieser Situation wird die gesamte direkte Sicht durch das Fahrzeug blockiert, alle visuellen Informationen müssen somit über die indirekte Sicht aufgenommen werden. Zusätzlich wird die Spiegelsicht durch den geknickten Auflieger beeinträchtigt und der relevante Sichtbereich damit vom Fahrzeug weg verschoben. Der Fahrer kann darauf nur mit extremen Kopfbewegungen zur Verschiebung des im Spiegel Klasse II dargestellten Sichtbereichs oder den Wechsel in den Spiegel Klasse IV reagieren (vgl. ECE-R 46/02 2009 Abs. 15.2.4.2). Im Weitwinkelspiegel (Klasse IV) werden zwar größere Sichtbereiche als im Spiegel Klasse II dargestellt (vgl. Abbildung 2-8), dies ist jedoch aufgrund seiner Krümmung nur mit viel kleineren Objektgrößen und optischen Verzerrungen möglich. Damit wird eine notwendige Abstandseinschätzung zu Objekten neben dem Auflieger und zur Rampenkante erschwert. Durch die starken Sichteinschränkungen, den großen Knickwinkel und die Vorgabe der zielgenauen Rampenanfahrt beschreibt S04 die kritischste während der realen Nutzung auftretende Rangier-Sichtsituation (Bothe et al. 2012a S. 1643).

Die nächste Kategorie der Einzelsituationen wird durch die Landstraßen-Sichtsituationen gebildet. In der ISO 16505 wird der Anwendungsfall der Geradeausfahrt auf der Landstraße nicht als kritisch eingestuft (vgl. ISO/FDIS 16505 2014 S. 40 ff. & 125 ff.). Zum Vergleich mit den komplexen Sichtsituationen (vgl. Abbildung 3-11) wird S05 innerhalb dieser Arbeit als Baseline-Szenario des Straßentyps Landstraße betrachtet. Der Fahrer fährt dazu außerorts mit angemessener Geschwindigkeit und ausreichendem Sicherheitsabstand auf der rechten Fahrspur einer Vorfahrtsstraße geradeaus (vgl. Isella 2012 S. 60). UC5 beschreibt die komplexe Kreisverkehrsdurchfahrt mit Anhänger (ISO/FDIS 16505 2014 S. 42) und es wird die Sichtsituation S06 abgeleitet. Die einzelnen Phasen können grob in die Annäherung, die Einfahrt, die Durchfahrt, die Ausfahrt und den Übergang in die anschließende Geradeausfahrt eingeteilt werden (vgl. Kapitel 1.1.4; Bothe et al. 2013b S. 298 ff.). Diese Sichtsituation stellt das Fahrmanöver mit den häufigsten Fahrtrichtungs- und den damit verbundenen Knickwinkelwechseln dar. Der Fahrer muss zur Bewältigung dieser Fahraufgabe zwischen linkem und rechtem Hauptspiegel hin- und herwechseln. Durch die hohen auftretenden Knickwinkel ist ebenfalls eine durch gezielte Kopfbewegungen gesteuerte Verschiebung des dargestellten Sichtbereichs notwendig. Bei einem Kreisverkehr mit vier Ein- und Ausfahrten werden in dieser Arbeit die Nutzung der ersten (S06-1), der zweiten (S06-2) und der dritten Ausfahrt (S06-3)

betrachtet. Abbiegevorgänge werden als kritische Anwendungsfälle von Sichtsystemen durch UC2 beschrieben (ISO/FDIS 16505 2014 S. 43). Für die Landstraße stellt das Linksabbiegen auf eine Vorfahrtsstraße (S07) die komplexeste Abbiegemöglichkeit dar. Der Fahrer stoppt das Fahrzeug an der Haltelinie und muss den Verkehr von der linken als auch von der rechten Seite gewähren lassen. Nachdem durch die direkte Sicht eine ausreichend große Lücke im Verkehrsfluss detektiert wird, fährt der Lkw an und biegt nach links in die vorfahrtsberechtigten Straße ein. Vor und während des Abbiegevorgangs werden das Fahrzeugumfeld sowie das Verhalten der eigenen Fahrzeugkombination überwacht. UC6 und die davon abgeleitete Sichtsituation S08 repräsentieren die spitzwinklige Auffahrt auf eine Vorfahrtsstraße. Aufgrund des Anfahrtswinkels kann der herannahende Verkehr weder über die direkte Sicht noch über die Spiegelsicht aus der normalen Augpunktlage beobachtet werden (vgl. ISO/FDIS 16505 2014 S. 125). Um den notwendigen Umgebungsbereich einsehen zu können ist bei konventionellen Spiegelsystemen eine Kopfbewegung unumgänglich (vgl. ISO/FDIS 16505 2014 S. 40). Sichtsituation S08 ist z. B. bei der Auffahrt auf eine Schnellstraße ohne Beschleunigungsstreifen anzutreffen.

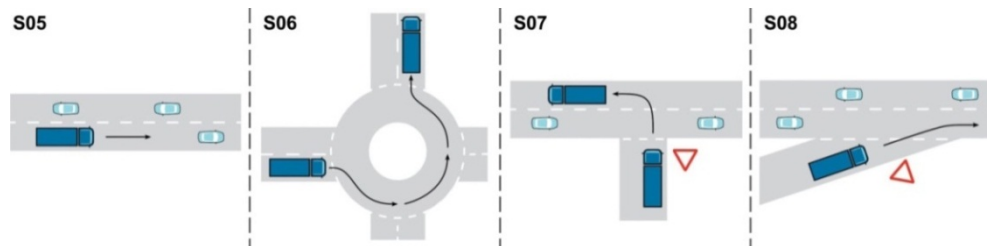


Abbildung 3-11: Landstraßen-Sichtsituationen (e. D. n. Isella 2012 S. 60 ff.)

Die Autobahnfahrt stellt durch die monotone Langzeitnutzung und die Notwendigkeit zur Einschätzung von weit entfernten Objekten, mit großer Relativgeschwindigkeit, einen nicht zu vernachlässigenden Anwendungsfall eines Kamera-Monitor-Systems (KMS) dar (ISO/FDIS 16505 2014 S. 41). Sichtsituation S09 (vgl. Abbildung 3-12) beschreibt die Fahrzeugfolgefahrt auf der rechten Spur der Autobahn und repräsentiert damit die Referenz dieser Kategorie. Der Spurwechsel UC8 wird als Teil des Überholmanövers S10 betrachtet. Hierbei wird nach dem Auffahren auf ein langsames Fahrzeug die Überholspur durch den fahrerseitigen Rückspiegel beobachtet. Ist eine ausreichende Lücke im Fluss der herannahenden Fahrzeuge identifiziert, wird durch einen Fahrspurwechsel der Überholvorgang eingeleitet und mit dem Einscheren vor dem langsamen Fahrzeug abgeschlossen (vgl. Isella 2012 S. 62). Bei dieser Sichtsituation stehen die Abstands- und Geschwindigkeits-schätzung im Vordergrund (ISO/FDIS 16505 2014 S. 40). Die Baustellendurchfahrt S11 repräsentiert das dritte Szenario der Autobahn-Situationen. Aufgrund der beachtlichen Fahrzeugabmessungen der Fernverkehrsfahrzeuge (vgl. Kapitel 3.1.3) und der höheren Gewichtung der Spurhalteaufgabe aufgrund der verengten Fahrspur ist diese Sichtsituation unter den Autobahnsituationen als komplex einzuschätzen.

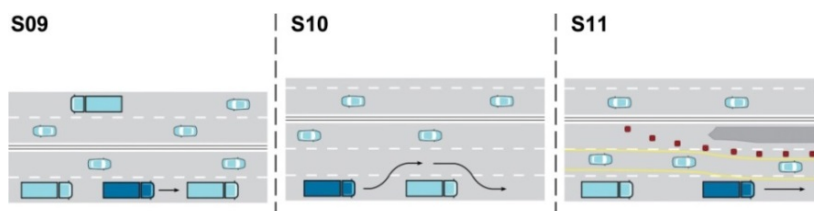


Abbildung 3-12: Autobahn-Sichtsituationen (e. D. n. Isella 2012 S. 62 ff.)

Zur Plausibilisierung der abgeleiteten Sichtsituation werden Erhebungen zu Unfällen mit Nutzfahrzeugbeteiligung herangezogen (vgl. Niewöhner et al. 2004; Feist & Mayrhofer 2006; Blower 2007; Pfaffenbauer et al. 2010; Cook et al. 2011; DESTATIS 2011; DESTATIS 2012). Demnach werden alle auf fehlende Informationsaufnahme über die indirekte Sicht zurückzuführenden fatalen Lkw-Unfälle durch die Sichtsituationen S01 bis S11 abgedeckt (vgl. Isella 2012 S. 53 ff.; Bothe et al. 2013b S. 295). Die Fahrstreckenzusammensetzung im Fernverkehr wird ebenfalls durch die vorgestellten Sichtsituationen repräsentiert, wobei über 65% der in Deutschland von Nutzfahrzeugen erbrachten Fahrleistungen in den Jahren 2010 und 2011 auf mautpflichtigen Autobahnen und Bundesstraßen zurückgelegt wurden (vgl. BAG 2011; BAG 2012; KBA 2011; KBA 2012; Isella 2012 S. 52 f.; Bothe et al. 2013b S. 295). Bei der Gewichtung der Faktorstufen muss somit insbesondere im Fernverkehrsumfeld die Priorisierung der Autobahn in die Fahrstreckenzusammensetzung einfließen.

## 3.2 Abhängige Variablen

Mit der Erhebung der abhängigen Variablen kann zunächst die Überprüfung und Beschreibung der Stichprobeneigenschaften durchgeführt werden. Im Vordergrund steht jedoch der Aufbau einer Rohdatenbasis zur späteren Analyse der Messergebnisse. Die in den Hypothesen in Kapitel 2.4 beschriebenen Fragestellungen werden auf Grundlage dieser Rohdaten bearbeitet. Die abhängigen Variablen werden in fünf Kategorien eingeteilt. Die fahrerbezogenen statischen Messwerte werden zur Stichprobenbeschreibung und zum Vergleich mit vorausgegangenen Untersuchungen erhoben. Fahrerindividuelle Fahrzeugeinstellungen werden durch die fahrzeugbezogenen statischen Messwerte dokumentiert. Die fahrerbezogenen dynamischen Messwerte bilden den innovativen Kern dieser Datenerhebung und sind insbesondere zur ergonomischen Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) erforderlich. Durch die fahrzeugbezogenen dynamischen Messwerte können die Abläufe während der Sichtsituationen anhand von kontinuierlichen Fahrzeugparametern beschrieben werden. Eine Bewertung des vermessenen Gesamtsystems wird durch die Erhebung subjektiver Kennwerte ermöglicht.

### 3.2.1 Fahrerbezogene statische Messwerte

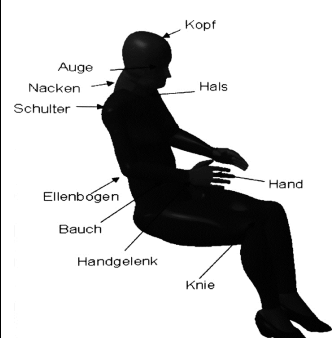
Die fahrerbezogenen statischen Messwerte werden probandenindividuell ein bis zweimal je Versuchsperson erhoben. Neben den in Kapitel 3.1 beschriebenen ergonomischen Leitmaßen werden als weitere anthropometrische Daten die Stammlänge (SL) und die Körpermasse (KM) ermittelt. Die demographischen Daten, die zur Beschreibung der Stichprobe und Selektion der zu analysierenden Teilmengen herangezogen werden, sind in Tabelle 3-2 zusammengestellt.

Tabelle 3-2: Demographische Daten zur Beschreibung der Stichprobe

Kurzzeichen	Beschreibung	Einheit	Kurzzeichen	Beschreibung	Einheit
<b>NAT</b>	Nationalität	-	<b>FL</b>	Lkw-Fahrleistung	[km/Jahr]
<b>G</b>	Geschlecht	[M/W]	<b>ST</b>	Stadtanteil der Lkw-Fahrleistung	[%]
<b>BJ</b>	Bezugsjahr	[Jahr]	<b>LA</b>	Landstraßenanteil der Lkw-Fahrleistung	[%]
<b>PO</b>	Population	-	<b>AB</b>	Autobahnanteil der Lkw-Fahrleistung	[%]
<b>A</b>	Lebensalter	[Jahre]	<b>FE</b>	Lkw-Fahrerfahrung	[Jahre]
<b>SH</b>	Nutzung Sehhilfe	[ja/nein]			

In den vorausgegangenen Untersuchungen zur Ermittlung von Körperhaltungen in Nutzfahrzeugen (vgl. Kapitel 2.3.1; Friedrichsen 2013 S. 48) wurden standardisierte Umfänge von stat. Körperpunkten der idealen Fahrhaltung gemessen. Zur Übertragbarkeit der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse und zum Vergleich mit bereits erhobenen Messwerten werden alle drei Koordinaten der in Tabelle 3-3 zusammengestellten statischen Körperpunkte im Kabinen-Koordinatensystem (KKOS) erfasst. Dazu wird der FARO-Messarm (vgl. Kapitel 2.3.1), mit dem jeder Körperpunkt manuell angefahren werden kann, als etabliertes Messsystem verwendet. Die statische Mittelaugpunktlage (GAUM) wird, da sie innerhalb des Schädels liegt, durch zwei orthogonale Messungen von rechts und von oben bestimmt.

Tabelle 3-3: Statische Körperpunkte der idealen Fahrhaltung im KKOS vgl. Jürgens 1989a S. 1 ff.

Nr.	Bezeichnung	Messinstruktion	Messposition am Körper
<b>KP01</b>	Kopfspitzpunkt (vertex)	von oben zu messen	
<b>KP02</b>	Mittelaugpunkt (exocanthus)	von rechts & oben zu messen	
<b>KP03</b>	Nackenzpunkt (cervicale)	von hinten zu messen	
<b>KP04</b>	Schulterpunkt (acromiale)	von rechts zu messen	
<b>KP05</b>	Ellenbogenpunkt (radiale)	von rechts/unten zu messen	
<b>KP06</b>	Handgelenkpunkt (stylium ulnare)	von rechts/unten zu messen	
<b>KP07</b>	Mittelhandpunkt (phalangion III)	von rechts/oben zu messen	
<b>KP08</b>	Halspunkt (suprasternale)	von vorne zu messen	
<b>KP09</b>	Bauchpunkt (abdominale)	von vorne zu messen	
<b>KP10</b>	Kniepunkt (patellare)	von rechts/oben zu messen	
<b>KP11</b>	Hüftpunkt	von rechts zu messen	

---

### 3.2.2 Fahrzeugbezogene statische Messwerte

---

Durch die in Abbildung 3-13 dargestellten Fahrzeugpunkte (FP) können die individuellen Fahrzeugeinstellungen der Probanden aufgezeichnet werden. Mit dem ausgewählten Messsystem (vgl. Kapitel 3.4) wird durch Messung der drei Referenzpunkte des linken Hauptspiegels (FP01 bis FP03) die Spiegelkontur und die Ausrichtung der Spiegeloberfläche eindeutig bestimmt (vgl. Kapitel 2.3.3; Lehto Way & Reed 2003 S. 2 & 5). Diese Informationen werden zur individuellen Berechnung der dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht benötigt. Auch der Hauptspiegel rechts und die beiden Weitwinkelspiegel sind jeweils mit drei Messpunkten belegt. Somit können alle vom Probanden vorgenommenen Spiegeleinstellungen dokumentiert werden. Zur Bestimmung der Lenkradposition und Ausrichtung ist aufgrund der direkt gekoppelten Lenkradkinematik die Messung des Referenzpunktes FP13 ausreichend. Zur Dokumentation der Schwingsitzeinstellung werden die beiden sitzkissenfesten Punkte FP14 und FP15 verwendet. Von diesen Punkten wird sowohl die fahrerindividuelle Lage des Sitzreferenzpunktes (H-Punkt) innerhalb des Sitzverstellfeldes als auch die Sitzkissenneigung abgeleitet.



Abbildung 3-13: Messpunkte im Kabinen-Koordinatensystem (KKOS) zur Dokumentation der probandenindividuellen Fahrzeugeinstellungen (e. D. mit Daimler 2014)

---

### 3.2.3 Fahrerbezogene dynamische Messwerte

---

Zur Bestimmung der während einer dynamischen Sichtsituation vom Fahrer genutzten Sichtbereiche der indirekten Sicht (vgl. Kapitel 1.1.4 & Kapitel 2.2.5) werden kontinuierliche Informationen über das Sichtverhalten benötigt. Dazu werden die Positionen des Kopfes und der Augen, sowie die Kopfausrichtungen und Sichtstrahlorientierungen während der gesamten Sichtsituation kontinuierlich aufgezeichnet. In Abbildung 3-14 sind die kopffesten Messpunkte und Blickrichtungsvektoren dargestellt. Mit dem ausgewählten fahrzeugfesten Messsystem (vgl. Kapitel 3.4.1; FaceLAB5 2009a S. 1 ff.) werden die dynamischen Augpunktlagen und Sichtstrahlorientierungen des rechten und des linken Auges im Kabinen-Koordinatensystem (KKOS) zu jedem Messzeitpunkt erfasst und aufgezeichnet. Somit können vom Fahrer durchgeführte Kopfbewegungen, die eine dynamische Veränderung der Augpunktlage mit sich bringen, dokumentiert werden. Zeitgleich kann über die Blickrichtung das Sichtziel in Bezug auf das KKOS bestimmt werden. Mit diesen Zusatzinformationen ist es möglich die Vielzahl der aufgenommen Augpunktlagen innerhalb der Analyse gezielt nach den relevanten Sichtzielen zu filtern.



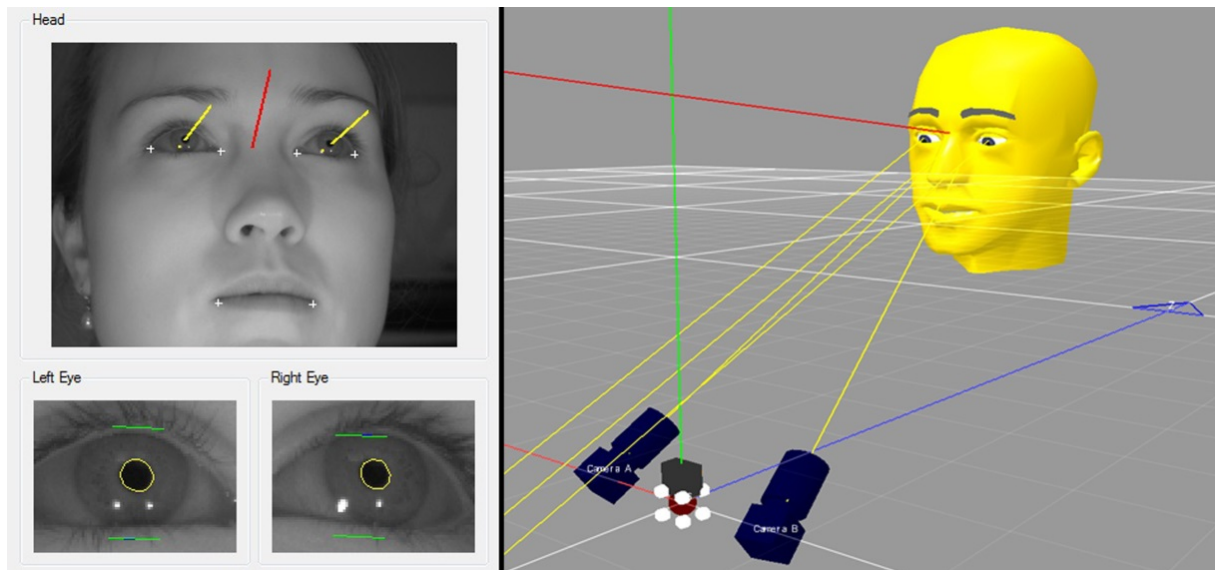


Abbildung 3-14: Messpunkte der dynamischen Augpunktlagen und Vektoren der dynamischen Sichtstrahlorientierungen dargestellt im Kabinen-Koordinatensystem

Eine Zusammenstellung der kontinuierlich aufgezeichneten Messwerte zur Beschreibung der dynamischen Sichtinteraktion ist in Tabelle 3-4 gegeben. Neben den geometrischen Daten liegen auch Messwerte, die zur Bewertung der Datenqualität eingesetzt werden können, vor. In dieser Arbeit wurden zur Absicherung einer ausreichenden Datenqualität die Rohdatenkennwerte HeadIn, Head Position Confidence, EyeClosureLeft und EyeClosureRight (vgl. FaceLAB5 2009a S. 86 ff.; FaceLAB5 2011 S. 4 ff.) herangezogen (vgl. Kapitel 4.1.1).

Tabelle 3-4: Dynamische fahrerbezogene Messwerte der Sichtinteraktion

Kurzzeichen	Bezeichnung	Beschreibung
<b>GAUL</b>	Augpunktlage links 3D	dreidimensionale Koordinaten des gemessenen linken Augmittelpunktes im KKOS
<b>GAUR</b>	Augpunktlage rechts 3D	dreidimensionale Koordinaten des gemessenen rechten Augmittelpunktes im KKOS
<b>GAUM</b>	Mittelaugpunktlage 3D	dreidimensionale Koordinaten der berechneten Mittellage zwischen GAUL und GAUR im KKOS
<b>SOL</b>	Sichtstrahlorientierung GAUL 3D	dreidimensionale Vektordarstellung der gemessenen Ausrichtung der Fixationsachse der GAUL im KKOS
<b>SOR</b>	Sichtstrahlorientierung GAUR 3D	dreidimensionale Vektordarstellung der gemessenen Ausrichtung der Fixationsachse der GAUR im KKOS
<b>SOM</b>	Sichtstrahlorientierung GAUM 3D	dreidimensionale Vektordarstellung der berechneten Ausrichtung der Fixationsachse der GAUM im KKOS
<b>KPOS</b>	Kopfposition 3D	dreidimensionale Koordinaten der gemessenen Kopfposition im KKOS
<b>KO</b>	Kopforientierung 3D	dreidimensionale Vektordarstellung der gemessenen Ausrichtung des Kopfes im KKOS
<b>HI</b>	HeadIn	Variable des Messsystems: beschreibt ob sich der Kopf des Probanden innerhalb des Aufzeichnungsvolumens befindet
<b>HPC</b>	Head Position Confidence	Variable des Messsystems: beschreibt die Qualität der Aufzeichnung der Kopfposition und -ausrichtung
<b>ECL</b>	EyeClosureLeft	Variable des Messsystems: beschreibt wie weit das linke Auge durch das Augenlid verschlossen ist
<b>ECR</b>	EyeClosureRight	Variable des Messsystems: beschreibt wie weit das rechte Auge durch das Augenlid verschlossen ist

### 3.2.4 Fahrzeugbezogene dynamische Messwerte

Um die fahrerbezogenen dynamischen Sichtdaten den Fahrzeugparametern während der dynamischen Sichtsituationen zuordnen zu können, werden zeitsynchron aufgezeichnete fahrzeugbezogene Messwerte benötigt. In Tabelle 3-5 sind die in dieser Arbeit verwendeten dynamischen fahrzeugbezogenen Messwerte aufgelistet.

Tabelle 3-5: Dynamische fahrzeugbezogene Messwerte der Sichtinteraktion

Kurzzeichen	Bezeichnung	Beschreibung	Einheit
<b>Speed</b>	Fahrzeuggeschwindigkeit	Geschwindigkeit der Fahrzeugkombination in Bezug auf die Fahrzeugumgebung	km/h
<b>LongAccel</b>	Längsbeschleunigung	Beschleunigung der Fahrzeugkombination in Fahrzeuglängsrichtung	m/s <sup>2</sup>
<b>LatAccel</b>	Querbearleunigung	Beschleunigung der Fahrzeugkombination in Fahrzeugquerrichtung	m/s <sup>2</sup>
<b>Steerangl</b>	Lenkradwinkel	Winkel des Lenkradeinschlags; im Uhrzeigersinn → negative Werte >-360° gegen Uhrzeigersinn → positive Werte <+360°	°
<b>SteerCount</b>	Lenkradumdrehungszähler	Anzahl der Lenkradumdrehungen; in Kombination mit dem Lenkradwinkel kann der Gesamtlenkradwinkel berechnet werden	-
<b>YawRate</b>	Giergeschwindigkeit	Winkelgeschwindigkeit der Drehung um die Fahrzeughochachse	°/s
<b>LongGPS</b>	geographische Länge	Längenkoordinate der geographischen Fahrzeugposition	° ' "
<b>LatGPS</b>	geographische Breite	Breitenkoordinate der geographischen Fahrzeugposition	° ' "
<b>Date</b>	Datum des Versuchs	Datum der Datenerhebung	dd-mm-jjjj
<b>Time</b>	Uhrzeit des Versuchs	Uhrzeit des Starts der Datenerhebung	hh-mm
<b>TimeSlot</b>	Messzeitpunkt in Versuch	Messzeitpunkt nach Start der Datenerhebung	10 <sup>-3</sup> s

Im Serienfahrzeug sind bereits Sensoren, deren Messwerte über das fahrzeuginterne Bussystem (CAN-Bus) zur Verfügung gestellt werden, verbaut. So werden die Fahrzeuggeschwindigkeit, die Längs- und Querbearleunigung, die Lenkradwinkelinformationen und die Giergeschwindigkeit direkt vom Fahrzeugbus (CAN-Bus) abgegriffen (vgl. Kapitel 3.4.3). Mit diesen fahrdynamischen Kennwerten können bereits klassifizierende Aussagen über die jeweilige Sichtsituation getroffen werden. Sie werden ebenfalls benötigt um die Parameterwerte einer automatisierten Verschiebung des innerhalb eines Kamera-Monitor-Systems (KMS) dargestellten Sichtbereichs zu bestimmen (vgl. Kapitel 2.2.5). Zur Dokumentation der Fahrzeugposition auf der Versuchsstrecke können die geographischen Längen- und Breitenkoordinaten über eine GPS-Antenne bestimmt werden. Datum und Uhrzeit des Starts der Datenerhebung liegen auf dem CAN-Bus und sollen ebenfalls aufgezeichnet werden. Durch das Trigger-Signal des Messzeitpunktes bezogen auf den Start der Datenerhebung (TimeSlot) liegt ein eindeutiger Suchschlüssel innerhalb des jeweiligen Versuchs vor. Durch die Kombination dieses Suchschlüssels mit den in Tabelle 3-6 dargestellten Parameterwerten der Versuchsperson (VP) und des Versuchsfahrzeugs (V) kann jeder aufgezeichnete Datensatz während des Gesamtversuchs eindeutig identifiziert werden. Die vom Versuchsleiter (VL) während der Fahraufgabe vorgenommene Einstufung der Sichtsituation wird zusammen mit den fahrzeugbezogenen dynamischen Messwerten ebenfalls im Fahrzeug dokumentiert.

Tabelle 3-6: Faktorstufen, die den fahrzeugbezogenen Messwerten zugeordnet werden

Kurzzeichen	Bezeichnung	Beschreibung
<b>VP</b>	Versuchsperson	Faktor A und B werden durch Versuchsdesign vorgegeben und im Fahrzeug dokumentiert
<b>V</b>	Versuchsfahrzeug	Faktor C wird durch Versuchsdesign vorgegeben und im Fahrzeug dokumentiert
<b>Scenario</b>	Sichtsituation	Faktor D wird durch VL klassifiziert und im Fahrzeug dokumentiert



### 3.2.5 Systembewertende subjektive Messwerte

Die vom Fahrer zum Durchfahren dynamischer Sichtsituationen benötigten Sichtbereiche (vgl. Kapitel 2.2.5) sollen mit den während dieses Versuches ermittelten Daten erhoben werden. Dazu wird die Sichtinteraktion bei der Nutzung der im Serienfahrzeug verbauten konventionellen Spiegelsysteme aufgezeichnet (vgl. Kapitel 3.5.2). Um abzusichern, dass die erhobenen Daten nicht durch das im Versuch eingesetzte Spiegelsystem limitiert werden, muss das Gesamtsichtsystem vom Probanden subjektiv bewertet werden. In Abbildung 3-15 ist ein Ausschnitt des vom Versuchsleiter nach der Befragung des Probanden befüllten Fragebogens dargestellt.

1. Wie gut können Sie die Sichtbereiche außerhalb des Fahrzeugs über die Spiegel einsehen?

sehr gut    ☐ 1    ☐ 2    ☐ 3    ☐ 4    ☐ 5    ☐ 6    sehr schlecht

Sortieren Sie die sechs Spiegel nach ihrer Wichtigkeit für die eben erlebten Situationen.  
(1 = sehr wichtig ... 6 = weniger wichtig)



Benötigen Sie für die eben erlebten Situationen größere Sichtbereiche (SB) bzw. Objektgrößen (OG) in den jeweiligen Spiegeln?    ☐ ja    ☐ nein

Begründung/Zusatz/Kommentar:

---

2. Wie zufrieden sind Sie allgemein mit den Sichtbedingungen in den eben erlebten Situationen?

sehr zufrieden    ☐ 1    ☐ 2    ☐ 3    ☐ 4    ☐ 5    ☐ 6    sehr unzufrieden

Begründung/Zusatz/Kommentar:

---

3. Wie sicher fühlten Sie sich in der eben erlebten Situation?

sehr sicher    ☐ 1    ☐ 2    ☐ 3    ☐ 4    ☐ 5    ☐ 6    sehr unsicher

Begründung/Zusatz/Kommentar:

Abbildung 3-15: Ausschnitt des versuchsbegleitenden Fragebogens zur Erhebung der subjektiven Bewertung des konventionellen Gesamtsichtsystems

Mit der ersten Frage werden die Sichtbereiche der indirekten Sicht anhand der sechsstufigen Skala von sehr gut bis sehr schlecht allgemein bewertet. Es folgt eine situationsabhängige Bestimmung der Wichtigkeitsrangfolge der sechs am Fahrzeug verbauten Spiegel. Werden für die erlebten Sichtsituationen größere Sichtbereiche bzw. Objektgrößen benötigt, kann dieses Merkmal am jeweiligen Spiegel verortet notiert werden. Extreme Bewertungen werden durch Kommentare und Zusätze begründet. Mit der zweiten Frage werden die Sichtbedingungen durch die Zufriedenheit mit der direkten und indirekten Sicht subjektiv bewertet. Dadurch besteht die Möglichkeit auch Sichtverdeckungen der direkten Sicht, wie sie während der Sichtsituationen dynamisch auftreten (vgl. Kapitel 2.1.3), zu erfassen. In Frage drei wird das Sicherheitsempfinden des Fahrers innerhalb des Gesamtfahrzeugs während der durchfahrenen Sichtsituationen abgefragt. Der Fragebogen wird nach Absolvierung mehrerer Sichtsituationen einer Kategorie (vgl. Kapitel 3.1.4) zu den im Ablaufplan (vgl. Kapitel 3.3.3) dokumentierten Zeitpunkten befüllt.

### 3.3 Versuchsdesign

Um innerhalb des Probandenversuchs alle unabhängigen Variablen berücksichtigen zu können, wurde das in Abbildung 3-16 dargestellte 4-faktorielle Versuchsdesign aufgestellt. Der Gesamtversuch wird in drei Einzelversuche mit den Fahrzeugvarianten V1, V2 und V3 unterteilt. Innerhalb jedes Einzelversuchs werden die Sichtsituationen S01 bis S11 von den Probanden durchfahren. Dabei wird die Variation der Körperhöhe (KH) und des Taillenumfangs (TU) durch die Zusammenstellung des Probandenkollektivs berücksichtigt.

		Variation des Faktors D: Sichtsituation										
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11
Variation des Faktors C: Fahrzeugvariante	V1	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU
	V2	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU
	V3	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU	KH & TU
Variation der Faktoren A & B: Körperhöhe & Taillenumfang												

Abbildung 3-16: 4-faktorielles Versuchsdesign

#### 3.3.1 Konzeption der empirischen Betrachtung

Mit den erhobenen Daten sollen die in Kapitel 2.4 aufgestellten Hypothesen überprüft werden. Ein festgestellter Effekt muss eine gewisse Größe besitzen um eine Auswirkung auf die ergonomische Auslegung nach sich zu ziehen. Zur Beschreibung dieser Relevanz wird unter anderem die Effektstärke herangezogen. Eine etablierte Methode zur Beschreibung der Effektstärke wurde von Cohen (1988 S. 20 ff. & 1990 S. 1304 ff.) vorgeschlagen. Zur Berechnung der Effektstärke (Cohen's d) wird die Mittelwertdifferenz (MWD) durch die mittlere Standardabweichung (SD) geteilt. Für  $d = 0,2$  wird ein kleiner, für  $d = 0,5$  ein mittlerer und für  $d = 0,8$  ein großer Effekt beschrieben. Neben dem standardisierten Maß der Effektstärke ist bei der auslegungsorientierten Bewertung von Effekten der zugrundeliegende Abstandswert der betrachteten Mittelwerte zu beachten. Die Beurteilung von Mittelwertdifferenzen (MWD) findet in dieser Untersuchung anhand der Auswirkungen der Nichtbeachtung des aufgedeckten Effekts bei der ergonomischen Auslegung statt. Für das Beispiel der Augpunktlage hat eine MWD von  $< 10$  mm nur geringe Auswirkungen. MWD im Bereich von  $\geq 10$  mm  $< 20$  mm sind bereits beachtenswert. Ab einer MWD von  $\geq 20$  mm sind die aufgedeckten Effekte auslegungsrelevant.

Abhängig von der Stärke der innerhalb eines Tests aufzudeckenden Effekte kann der dazu benötigte Stichprobenumfang (N) berechnet werden. Die Kennlinien dieses Zusammenhangs für t-Tests (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 414; Wilcox 1996 S. 240) sind in Abbildung 3-17 dargestellt.

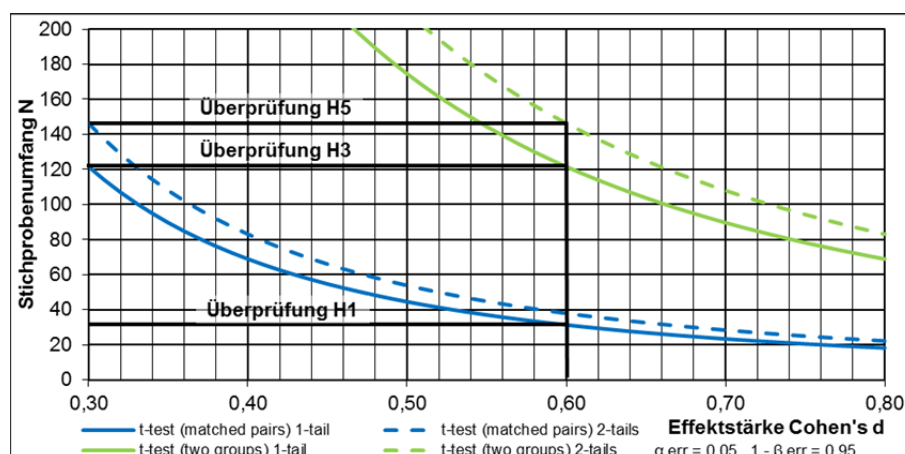


Abbildung 3-17: Ableitung der erforderlichen Stichprobengröße (N)



Um bei der Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese H1 eine Effektstärke Cohen's  $d = 0,6$ , was bei einer angenommenen Standardabweichung  $SD = 50$  mm einer auslegungsrelevanten Mittelwertdifferenz  $MWD = 30$  mm entspricht, zu erreichen werden mindestens 31 Probanden benötigt. Zur Überprüfung der Hypothese H3 werden unabhängige Stichproben durch einen t-Test (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 417; Wilcox 1996 S. 126; Field 2013 S. 371) miteinander verglichen und es erhöht sich der erforderliche Gesamtstichprobenumfang auf  $N = 122$ . Um Effekte mit einer Effektstärke von 0,6 im t-Test für unabhängige Stichproben zur Bearbeitung der nicht gerichteten Unterschiedshypothese H5 aufzudecken werden sogar 146 Probanden benötigt. Um die Überprüfung aller Hypothesen sicherzustellen wird ein auswertbarer Stichprobenumfang des Gesamtversuchs von  $N = 150$  angesetzt. Da bei dem beschriebenen umfangreichen und neuartigen Versuchsdesign damit gerechnet werden muss, dass durch mögliche Messtechnikausfälle oder partiell zu geringe Datenqualität nicht alle gemessene Probandendaten ausgewertet werden können, wird die Gesamtanzahl der im Versuch zu vermessenden Probanden auf  $N = 180$  erhöht.

Alle p-Werte, die innerhalb dieser Untersuchung auf Grundlage der Gesamtstichprobe oder einer Teilstichprobe daraus ermittelt werden, werden nach dem Verfahren von Hochberg (1988 S. 800 ff.) korrigiert. Dies ist notwendig um den Effekt der zufälligen Signifikanz bei hohen Testumfängen basierend auf einer einzelnen Stichprobe zu minimieren.

### 3.3.2 Versuchsumgebung

Während des Probandenversuchs sollen Daten der dynamischen Sichtinteraktion zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umgebung bei der Nutzung konventioneller Spiegelsysteme erhoben werden. Daher muss das Nutzungsszenario, die Darstellung der indirekten Sicht und das Fahrverhalten des Nutzfahrzeugs so realitätsnah wie möglich gestaltet werden. Bevor der Versuchsablauf definiert werden kann, wird zunächst die Versuchsumgebung ausgewählt. In Tabelle 3-7 sind die von Breuer (2012 S. 57 ff.) zusammengetragenen Vor- und Nachteile von Probandenversuchen im Fahrsimulator und im realen Straßenverkehr aufgelistet. Der Fahrsimulator ist zur gefahrlosen Darstellung kritischer Situationen besonders geeignet, hat aber Nachteile im hohen Betriebsaufwand und der Realitätsnähe. Feldversuche heben sich durch die realistische Darstellungen der Umwelt und der Fahrdynamik hervor, können aber erst spät im Entwicklungsprozess eingesetzt werden.

Tabelle 3-7: Vergleich der Vor- und Nachteile unterschiedlicher Versuchsumgebungen (nach Breuer 2012 S. 57 ff.)

	Vorteile	Nachteile
<b>Fahrsimulator</b> <b>(Laborversuch)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>genaue Einstellbarkeit und hohe Reproduzierbarkeit</li> <li>in der frühen Entwicklungsphase einsetzbar</li> <li>gefahrenlose Darstellung kritischer Situationen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Simulatorspezifische Artefakte z.B. Veränderung des Fahrerverhaltens durch eingeschränktes Gefährdungsbewusstsein und wahrnehmungsphysiologische Einschränkungen</li> <li>Aufwand durch Betrieb von Hard- und Software, Szenariengestaltung und Abbildung von Fahrzeugen und Systemen</li> <li>Ausfall von Probanden aufgrund von „motion sickness“</li> </ul>
<b>Realer Straßenverkehr</b> <b>(Feldversuch)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tests in realistischer Umgebung</li> <li>freies Fahren ohne Einschränkungen des Nutzungsverhaltens</li> <li>große geographische Flexibilität: Versuche können an allen Orten stattfinden z. B. Zielmärkte</li> <li>Absicherungsdaten mit höchster Validität: Fahrzeuge können im Serienstand unter realen Bedingungen erprobt werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>systematische Variation von Faktoren sehr aufwendig</li> <li>reproduzierbare Vorgabe einzelner Szenarien schwer möglich</li> <li>erst spät im Entwicklungsprozess einsetzbar</li> <li>ggf. Zusatzaufwand für spezielle Sicherheitsvorrichtungen bei Einsatz von Vorserienfahrzeugen</li> </ul>

Da beim geplanten Versuch die realistische Darstellung von dynamischen Sichtverhältnissen während der Transportaufgabe im Vordergrund steht und die Messungen an Serienfahrzeugen durchgeführt werden sollen, wurde der reale Straßenverkehr als Versuchsumgebung ausgewählt. Damit ist eine

hohe Flexibilität bei der Planung des Probandenversuchs gegeben. Auch die beiden in Kapitel 2.3.2 vorgestellten Versuche zur Messung dynamischer Sichtdaten wurden im realen Straßenverkehr durchgeführt (vgl. Scholly 2002 S. 10; Woyna 2013 S. 67). Die realistische Darstellung der Sichtverhältnisse im bewegten Fahrsimulator ist bereits aufgrund der immensen Abmessungen eines Fernverkehrsfahrerhauses und den vielen umzusetzenden Sichtsituationen (vgl. Kapitel 3.1.4) eine große Herausforderung. Die Simulation aller fahrdynamischen Einflüsse beim Durchfahren von komplexen Verkehrssituationen, wie dem Kreisverkehr, unter realistischer Berücksichtigung anderer Verkehrsteilnehmer ist mit überschaubarem Aufwand nicht umsetzbar. Den Nachteilen des Feldversuchs kann mit einer systematischen Ablaufplanung begegnet werden.

### 3.3.3 Ablaufplan

Während des Probandenversuchs wird eine Vielzahl von unterschiedlichen Daten erhoben (vgl. Kapitel 3.1 und Kapitel 3.2). Da anthropometrische Daten, wie die Körperhöhe, nicht im Fahrzeug bestimmt werden können, wird der Versuch in eine erste Phase im Labor und eine zweite Phase im Fahrzeug aufgeteilt. Die Einzelpunkte der ersten Phase sind in Abbildung 3-18 in chronologischer Abfolge dargestellt. Nach einer Begrüßung des Probanden durch den Versuchsleiter folgt die Überprüfung der zur Teilnahme am Versuch notwendigen Fahrerpapiere. Um die Versuchsfahrzeuge bewegen zu dürfen muss die Fahrberechtigungsklasse CE im Führerschein eingetragen sein. Durch die Kontrolle und Verwendung der personalisierten Fahrerkarte (vgl. BMVBW 2005 § 5) wird sichergestellt, dass vor und während des Versuchs die gesetzlich vorgeschriebenen Lenkzeiten nicht überschritten werden. Diese Maßnahme ist notwendig um sicherzustellen, dass die teilnehmenden Lkw-Fahrer den Probandenversuch nicht nach einer langen Lenkzeit und damit übermüdet durchführen. Innerhalb des Versuchs soll vielmehr eine alltägliche Transportaufgabe, die vom Proband als Teil seiner Arbeitsschicht erfüllt wird, simuliert werden. Es folgt die Erhebung der demographischen Daten (vgl. Kapitel 3.2.1). Am Versuch nehmen hauptsächlich Berufskraftfahrer, von denen in der verfügbaren Probandendatenbank keine anthropometrischen Daten vorliegen, teil. Daher werden die ergonomischen Leitmaße und das Körpergewicht jedes Probanden im Labor ermittelt. Somit ist auch sichergestellt, dass aktuelle Messwerte der Körperhöhe, der Stammlänge und des Taillenumfangs vorliegen. Aufgrund der Fahrt mit einem Versuchsfahrzeug im öffentlichen Straßenverkehr ist eine Sicherheitsunterweisung durch den Versuchsleiter notwendig. Nach der Erläuterung des geplanten Versuchsablaufs wird von der Laborumgebung ins Fahrzeug gewechselt.

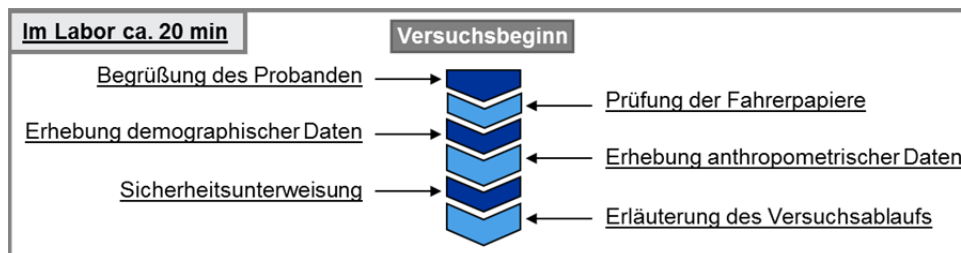


Abbildung 3-18: Ablaufplan Probandenversuch Teil 1 im Labor

Die weiteren Punkte des Versuchsablaufs sind in Abbildung 3-19 wiedergegeben. Der Proband nimmt auf dem Fahrersitz, der Versuchsleiter auf dem Beifahrersitz des Versuchsfahrzeugs Platz. Noch im Fahrzeugstillstand wird die Grundeinstellung von Sitz, Lenkrad und Spiegeln durch den Probanden vorgenommen. Der Versuchsleiter gibt eine Einführung in die zur Durchführung der folgenden Fahraufgabe notwendigen Bedienelemente des Fahrzeugs.

Der Proband fährt anschließend eine vorgegebene Eingewöhnungsstrecke um die vorgenommenen Fahrzeugeinstellungen zu überprüfen und durch die Feinjustierung von Sitz, Lenkrad und Spiegel seine bevorzugte Fahrhaltung einzunehmen. Zur Erzielung repräsentativer Fahrhaltungsmessungen ist eine dynamische Eingewöhnungsphase zwingend erforderlich (vgl. Manary et al. 1998 S. 7). Die gefundene Fahrhaltung wird durch die Messung der statischen Körperpunkte (vgl. Kapitel 3.2.1) dokumentiert. Die Fahrzeugeinstellungen werden über die statischen Fahrzeugpunkte (vgl. Kapitel 3.2.2) aufgezeichnet. Diese beiden Messvorgänge werden im Unterpunkt „Messung statischer Daten Teil 1“ in Abbildung 3-19 zusammengefasst. Nach der Eingewöhnungsphase wird durch eine Befragung des Probanden eine erste subjektive Bewertung des Gesamtsystems (vgl. Kapitel 3.2.5) durchgeführt. Im weiteren Versuchsablauf folgen Bewertungen nach derselben Systematik. Diese

werden jeweils bei Fahrzeugstillstand durchgeführt und beziehen sich auf die zuvor durchfahrenen Sichtsituationen. Das Messsystem zur Aufzeichnung der dynamischen Sichtdaten (vgl. Kapitel 3.2.3) wird vom Versuchsleiter auf die probandenindividuelle Fahrhaltung ausgerichtet und individuell kalibriert (vgl. Kapitel 3.5.1). Durch dieses Vorgehen ist eine optimale Ausnutzung des systemseitig begrenzten Aufzeichnungsvolumens gewährleistet. Mittels einer Probemessung wird die Funktionstüchtigkeit aller Systeme sichergestellt.

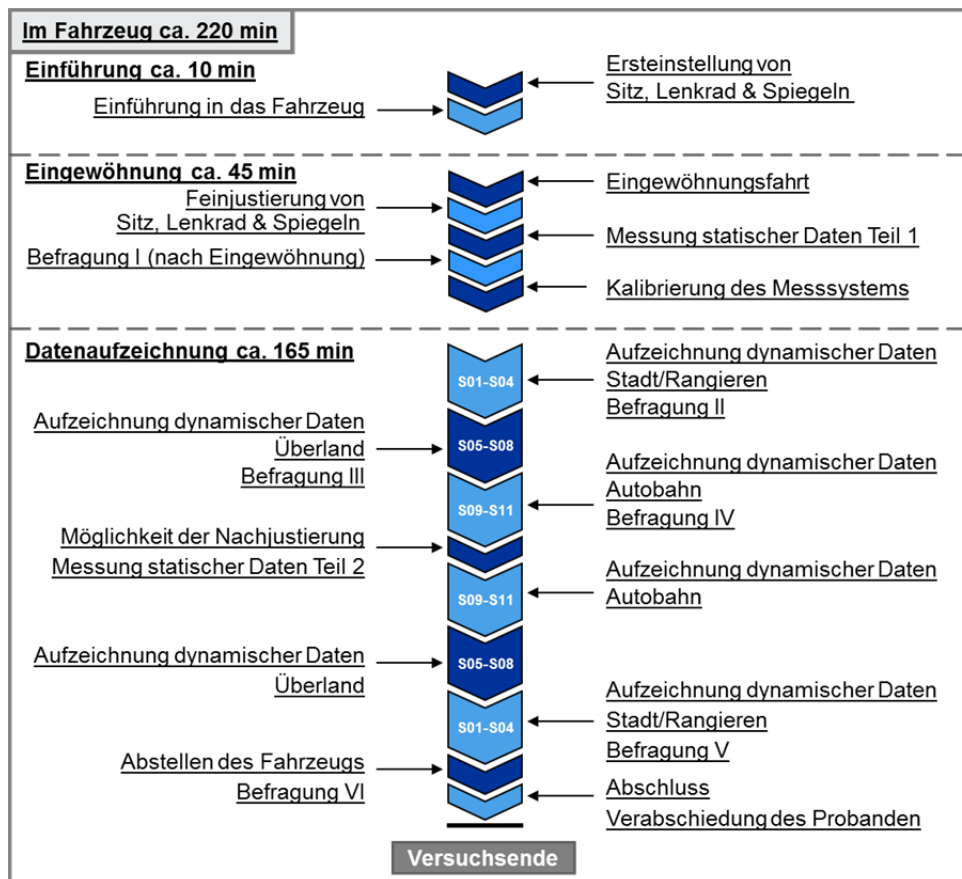


Abbildung 3-19: Ablaufplan Probandenversuch Teil 2 im Fahrzeug

Nach dieser fahrerindividuellen Vorbereitung kann die Messung der Sichtinteraktion anhand der dynamischen fahrer- und fahrzeugbezogenen Messwerte (vgl. Kapitel 3.2.3 & Kapitel 3.2.4) durchgeführt werden. Dazu werden die Sichtsituationen, wie in Kapitel 3.3.4 dargestellt, nacheinander abgefahren und aufgezeichnet. Der Versuchsleiter begleitet die gesamte Versuchsfahrt auf dem Beifahrersitz. Er gibt dem Fahrer Anweisungen zum Streckenverlauf und löst die Messungen zu den entlang der Versuchsstrecke definierten Positionen aus. Es ist damit sichergestellt, dass die richtigen Situationen aufgezeichnet werden und der Proband während der Aufzeichnungsphase kein abgelenktes Sichtverhalten aufweist. Zeitgleich kann vom Versuchsleiter die Datenqualität der Messung kontrolliert und gegebenenfalls optimiert werden.

Um die nutzfahrzeugtypische Transportaufgabe möglichst realitätsnah zu simulieren wird innerhalb dieses Versuchs der fernverkehrstypische Arbeitsalltag eines Lkw-Fahrers nachgestellt. Dieser beginnt mit der Aufnahme von Waren an einem Logistikzentrum, es folgen Rangier-, Stadt- und Überlandsituationen bevor eine lange Autobahnphase absolviert wird. Nach dem Schnellstraßenanteil folgen wieder Landstraßen-, Stadt- und Rangiersituationen ehe der Lkw-Fahrer den Bestimmungsort seiner Fracht erreicht. Der Versuch ist auf eine Durchführungszeit von vier Stunden ausgelegt. Damit können Langzeiteinflüsse zwar nicht vollständig berücksichtigt werden, es ist jedoch aufgrund der ausführlichen Eingewöhnungsphase und umfangreichen Aufzeichnungsphase mit realistischem Sichtverhalten während der Datenerhebung zu rechnen.

Zur Datenaufzeichnung werden die Rangiersituationen S03 und S04 auf einem Logistikgelände mit ausreichenden aber begrenzten Rangierflächen und Laderampen durchgeführt. Es folgt die zweite Befragung zur subjektiven Bewertung des Gesamtsystems, nun bezogen auf die eben durchfahrenen

Rangier-Sichtsituationen. Der Versuchsstrecke folgend durchfährt der Proband nun die vom Versuchsleiter im Messsystem digital dokumentierten Stadt- und Überland-Szenarien (S01, S02, S05-08). Mit der subjektiven Befragung wird die erste Überlandphase abgeschlossen. Es folgt die umfangreiche Aufzeichnung der dynamischen Sichtdaten auf der Autobahn. Der erste Autobahnabschnitt endet mit der Befragung zur Systembewertung am südlichen Wendepunkt (vgl. Abbildung 3-21). Nun besteht die Möglichkeit die nach der Eingewöhnungsphase festgelegten und seitdem konstant gehaltenen Fahrzeugeinstellungen nachzujustieren. Die potentiell adaptierten Fahrzeugeinstellungen und die darauf beruhende statische Fahrhaltung nach der ersten Autobahnfahrt werden durch die statischen Messungen (Teil 2) dokumentiert. Innerhalb des zweiten Autobahnabschnitts werden wiederum die Daten der dynamischen Sichtinteraktion während der Kolonnenfahrt (S09), des Überholmanövers (S10) und der Baustellendurchfahrt (S11) aufgezeichnet. Es folgen in umgekehrter Reihenfolge die Überland-, Stadt- und Rangiersituationen. Nach den Rangieraufgaben, die wiederum das rückwärts Schieben (S03) und die Rampenanfahrt über rechts (S04) beinhalten, wird die Befragung zur subjektiven Bewertung des Gesamtsystems in Bezug auf die zuvor bewältigten Situationen durchgeführt. Das Versuchsfahrzeug wird am Halteplatz abgestellt und es folgt eine rekapitulierende Befragung, die die Interaktion mit dem konventionellen Spiegelsystem in Hinblick auf die gesamte durchgeführte Transportaufgabe thematisiert, vollzogen. Damit ist die Phase der Datenaufzeichnung im Fahrzeug abgeschlossen und der Proband kann verabschiedet werden.

### 3.3.4 Versuchsstrecke

Die Versuchsstrecke wurde unter mehreren Gesichtspunkten ausgewählt. Zum einen sollen die notwendigen Sichtsituationen in der durch den Ablaufplan vorgegebene Reihenfolge und mit fernverkehrstypischer Gewichtung durchgeführt werden. Zum anderen muss die Versuchsstrecke über die Gesamtdauer der Versuchsdurchführung von fünf Monaten täglich von 6.00 Uhr bis 19.00 Uhr flüssig befahrbar sein. In Abbildung 3-20 sind die Rangier-, Stadt- und Landstraßenanteile und in Abbildung 3-21 die Autobahnanteile der ausgewählten Versuchsstrecke dargestellt.



Abbildung 3-20: Versuchsstrecke Teil 1 mit Rangier-, Stadt- und Landstraßenanteilen (e. D. aus Google Maps 2014)



Die Gesamtlänge der Versuchsstrecke beträgt 140 km, wobei 5 km auf Ortsdurchfahrten, 15 km auf Überlandanteilen und 120 km auf Autobahnabschnitte entfallen. Die gewählte Streckenzusammensetzung spiegelt damit ein fernverkehrstypisches Profil wieder. Start- und Endpunkt der Versuchsstrecke liegt in Böblingen. Hier können die Vermessung der Probanden im Labor und im Fahrzeug vorgenommen, sowie die Rangiersituationen im realistischen Umfeld eines Logistikhofes durchgeführt werden. Während der Versuchsfahrt werden die notwendigen Fahrtrichtungsänderungen dem Probanden durch den Versuchsleiter frühzeitig mitgeteilt, damit dieser sein Fahr- und Blickverhalten dementsprechend planen kann. Die Wegpunkte an denen die Messungen der Sichtsituationen (S01 bis S11) vom Versuchsleiter ausgelöst und dokumentiert werden, sind in den Darstellungen der Versuchsstrecke eingetragen. Die Strecke wird so ausgewählt, dass der Proband jede Sichtsituation an unterschiedlichen Positionen mehrmals durchfährt. Damit werden Effekte, die auf außergewöhnliche Spurführungen oder Umgebungssituationen der einzelnen Messstellen zurückzuführen sind, so weit wie möglich reduziert. Die Kreisverkehrsdurchfahrt wurde in drei Variationen mit der Nutzung der ersten, zweiten und dritten Ausfahrt berücksichtigt.



Abbildung 3-21: Versuchsstrecke Teil 2 Autobahnabschnitt (e. D. aus Google Maps 2014)

Auf dem langen Autobahnabschnitt, der den größten Teil der Versuchsstrecke einnimmt, können die Kolonnenfahrten (S09) und die Überholmanöver (S10) absolviert werden. Am Wendepunkt bei Sulz am Neckar befindet sich ein Parkplatz, der nach dem ersten Autobahnabschnitt angefahren wird. An dieser Haltemöglichkeit wird die Befragung und Messung der statischen Fahrhaltung im Fahrzeug vorgenommen. Bei der Rückfahrt wird derselbe Autobahnabschnitt in entgegengesetzter Fahrtrichtung befahren. Dadurch kann die Abhängigkeit von Umgebungseinflüssen, wie kritischen Sonnenstände oder charakteristischen Fahrstreckentopographien, reduziert werden. Im Autobahnabschnitt zwischen Böblingen und Gärtringen wurden während der gesamten Versuchszeit Bauarbeiten in beiden Fahrtrichtungen vorgenommen. Die dadurch bestehenden Fahrspurverengungen wurden zur Aufzeichnung der Sichtdaten innerhalb der Baustellendurchfahrt (S11) herangezogen.

### 3.3.5 Probandenakquise

Zur Akquise der 180 Versuchsteilnehmer wurden Lkw-Fahrer auf Parkplätzen, Rasthöfen und direkt in den Speditionen angesprochen. Dabei wurden die in Tabelle 3-8 aufgelisteten Rahmenbedingungen der Versuche kommuniziert. Es wurde ein Versuchsziel, das den Probanden bei der Akquise mitgeteilt wird, definiert. Die Daten wurden innerhalb des folgenden Versuchszeitraums erhoben.

Tabelle 3-8: Angaben zum Versuchsablauf und -umfang

Kategorie	Beschreibung
<b>Versuchsziel und -ablauf</b>	Untersuchung der Fahrhaltung von LKW-Fahrer in realen Situationen Diese Untersuchung soll zur ergonomisch korrekten Auslegung zukünftiger Fahrzeuge helfen. Der Versuchsablauf soll nachfolgend kurz beschrieben werden: 1) Erfassen von Körpermaßen 2) Einweisung in das Fahrzeug und den Versuchsablauf 3) Versuchsfahrt mit Vermessungen im Fahrzeug 4) Interview Während des gesamten Versuchsablaufs wird ein Versuchsleiter die Teilnehmer betreuen.
<b>Termindauer pro Proband</b>	4h
<b>Versuchstermine täglich</b>	06:00 - 10:00Uhr 10:30 - 14:30Uhr 15:00 - 19:00Uhr

Da die Durchführung des Versuchs vier Stunden in Anspruch nimmt und die dynamischen Sichtdaten am Tag erhoben werden sollen, werden drei Versuchszeiträume pro Tag definiert. Inklusive der Vor- und Nachbereitung werden damit täglich von 05.00 bis 20.00 Uhr Versuche durchgeführt. Über diese Zeitspanne kann der Versuch nicht von einer Person betreut werden. Während des Gesamtversuchs werden daher fünf Versuchsleiter eingesetzt.

Pro Fahrzeugvariante werden 60 männliche Probanden nach den Anforderungen an die Stichprobenzusammensetzung (vgl. Tabelle 3-9) terminiert. Um die Faktorstufen der Körperhöhe wie in Kapitel 3.1.1 definiert abzudecken, werden die Probanden anhand der drei Körperhöhengruppen akquiriert. Die Altersverteilung soll den Wertebereich von 21 bis 65 Jahren, der das Lebensalter der zum gewerblichen Gütertransport berechtigten Lkw-Fahrer widerspiegelt, in homogener Verteilung abdecken. Die Körperhöhe wird als Hauptauswahlkriterium der ergonomischen Leitmaße verwendet, da es das bekannteste anthropometrische Maß darstellt und bei den meisten Männern während der Musterung standardisiert erfasst wurde. Die Einflüsse des Alters auf das anthropometrische Profil sind im Vergleich zum Taillenumfang begrenzt (vgl. Jürgens 1999 B-1.2; Jürgens et al. 2000 S. 30 ff.).

Tabelle 3-9: Anforderungen an die Stichprobenzusammensetzung

Auswahlkriterium	Beschreibung
<b>Geschlechtsverteilung</b>	100% männlich
<b>Körperhöhenverteilung</b>	3 x 20 VPs $KH \leq 1,68m$ 3 x 20 VPs $1,75 \leq KH \leq 1,79m$ 3 x 20 VPs $1,87 \leq KH$
<b>Altersverteilung</b>	21 - 65 Jahre in homogener Verteilung
<b>Fahrerfahrung mit Fahrzeugtypen</b>	Gliederzugkombination (Fernverkehr) Sattelzugkombination (Fernverkehr)
<b>Fahrberechtigung</b>	Führerschein (Klasse – CE) Fahrerkarte (muss zum Versuch mitgebracht und verwendet werden)
<b>Fahrerprofil</b>	Berufskraftfahrer mit Lkw-Jahreskilometerleistung von mind. 10.000 km

Um innerhalb des Versuchs ein realitätsnahes Sichtverhalten und nicht die Einlernphase in eine unvertraute Zugkombination aufzuzeichnen, werden nur Lkw-Fahrer, die in ihrem Arbeitsalltag die Zugzusammensetzung des Versuchsfahrzeugs bewegen, eingeladen. Für die Fahrberechtigung werden die Führerschein-Klasse CE und eine personifizierte Fahrerkarte benötigt. Das Fahrerprofil wird auf Berufskraftfahrer mit einer Lkw-Jahreskilometerleistung von min. 10.000 km eingeschränkt.

### 3.3.6 Stichprobenbeschreibung

Von den 180 männlichen Probanden, die am Versuch teilgenommen haben, liegen für 152 Versuchspersonen alle statischen und dynamischen Messwerte in zur Analyse notwendigen Datenqualität (vgl. Kapitel 4.1.1) vor. Diese 152 Probanden bilden die Gesamtstichprobe der weiteren Analysen. Die anthropometrischen und demographischen Daten der durch die Faktorstufen der Fahrzeugvariante separierten Teilstichproben sind in tabellarischer Form im Anhang A5 aufgeführt. In Abbildung 3-22 sind die Lebensalter- und Lkw-Fahrfahrungsverteilungen der Gesamtstichprobe dargestellt. Im Durchschnitt sind die Probanden 44 Jahre alt und fahren seit 20 Jahren Lkw. Die homogene Verteilung des Lebensalters (A) reicht von 21 bis 64 Jahren und entspricht in diesem Maß der Reihemessung von Jürgens (vgl. Jürgens et al. 2000 S. 26). Auch die Verteilung der Lkw-Fahrfahrt (FE) entspricht der Referenzmessung (vgl. Jürgens et al. 2000 S. 27). Die Teilnehmer der drei Teilstichproben (V1 bis V3) unterscheiden sich in diesen demographischen Messwerten nicht signifikant voneinander.

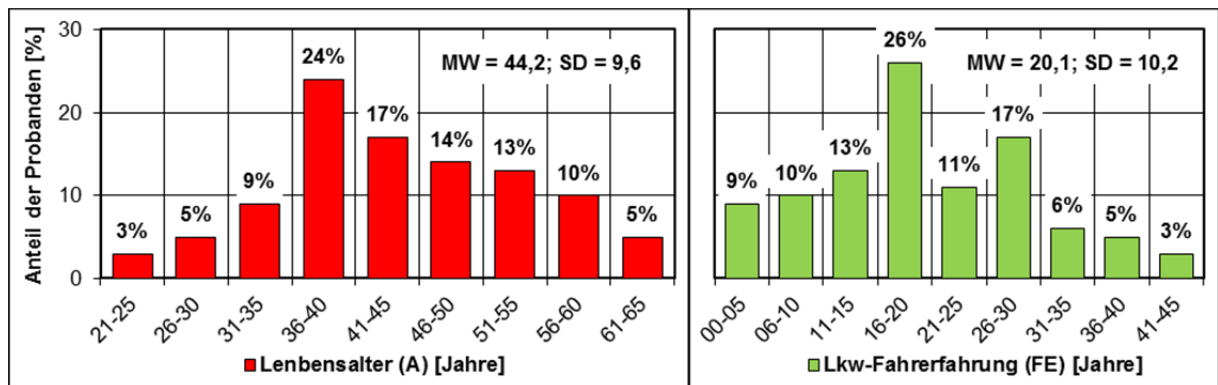


Abbildung 3-22: Lebensalter- und Lkw-Fahrfahrungsverteilungen der Stichprobe N = 152

Die Lkw-Fahrleistung (FL) liegt im Mittel bei 44.200 km pro Jahr und ist damit kleiner als die mittlere Jahresfahrleistung der Referenzmessung aus dem Jahre 2000, die bei 88.500 km pro Jahr liegt (vgl. Jürgens et al. 2000 S. 27). Diese Abweichung ist darauf zurückzuführen, dass die Forderung einer Mindestkilometerleistung von 10.000 km pro Jahr, während der Akquise nicht aufrechterhalten werden konnte und zugunsten der Repräsentation der Körperhöhenrandperzentile nach unten korrigiert wurde. Wie in Abbildung 3-23 dargestellt, haben jedoch 78% der Probanden eine jährliche Lkw-Kilometerleistung von > 10.000 km. Die Gesamtfahrleistung teilt sich durchschnittlich zu 38,9% auf Autobahnabschnitte (AB), zu 30,7% auf Landstraßenstrecken (LS) und zu 30,4% auf Stadtdurchfahrten (ST) auf. Die Teilstichproben unterscheiden sich nicht in ihrem Nutzungsverhalten.

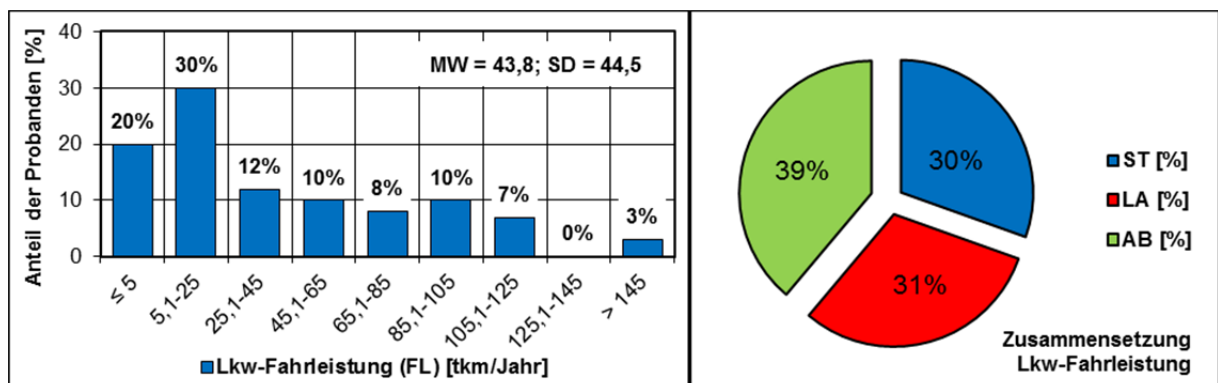


Abbildung 3-23: Lkw-Fahrleistungsverteilungen und -zusammensetzung der Stichprobe N = 152

Nach den demographischen Daten werden nun die anthropometrischen Kennwerte der Stichprobe im Detail beschrieben. Die Klassifizierung nach dem wichtigsten ergonomischen Leitmaß, das innerhalb dieser Untersuchung als Faktor eingesetzt wird, ist in Abbildung 3-24 zusammengestellt. Es können 31% der kleinen Körperhöhengruppe (KHG), 29% der mittleren KHG und 40% der großen KHG zugeordnet werden. Die Klassifizierung wurde durch die Faktorstufen, wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben

auf Grundlage der Referenzdaten von Jürgens et al. (2000 S. 30), bestimmt. Es werden alle Faktorstufen in ausreichendem Maße repräsentiert. Der Mittelwert (MW) der homogenen Verteilung liegt bei 1761 mm. Bei der Referenzerhebung wurde ein MW von 1768 mm bestimmt. In keiner der drei Versuchsgruppen lassen sich Unterschiede in der Verteilung der Körperhöhen feststellen.

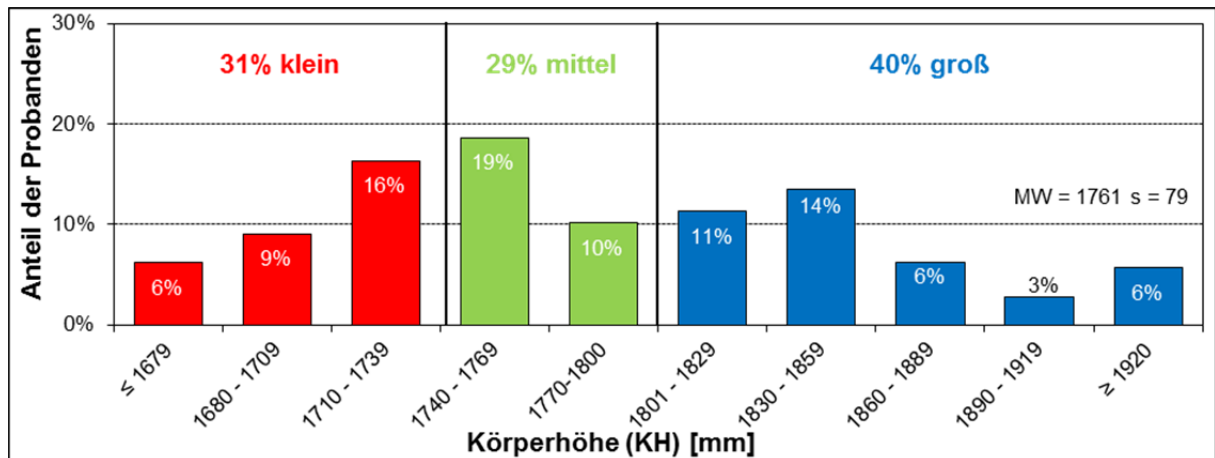


Abbildung 3-24: Klassifizierung der Stichprobe N = 152 nach den Körperhöhen

Die perzentilbasierte Darstellung der Körperhöhenverteilung ist in Abbildung 3-25 gezeigt. Dazu wurde für die Referenzerhebung (Jürgens et al. 2000 S. 30) und den durchgeführten Versuch jedem Perzentilwert die entsprechende Körperhöhe zugewiesen. Als weiterer Vergleichswert ist die Körperhöhenverteilung der jungen (20 bis 25 Jahre) männlichen deutschen Bundesbürger (Jürgens 1999 B-1.2), die zur Auslegung von Pkws herangezogen wird dargestellt. Vergleicht man die Kurven des durchgeführten Lkw-Versuchs und der Lkw-Referenzerhebung so ist festzustellen, dass die erhobenen Werte sehr gut mit den Referenzwerten korrespondieren. Abweichung von > 10 mm kommen nur im Bereich oberhalb des 70. Perzentils vor. In diesem Bereich sind die Messwerte des Versuch nach rechts (zu größeren Körperhöhen hin) verschoben. Dadurch ist auch zu erklären, warum 40% der Versuchsteilnehmer der großen Körperhöhengruppe zugeteilt wurden.

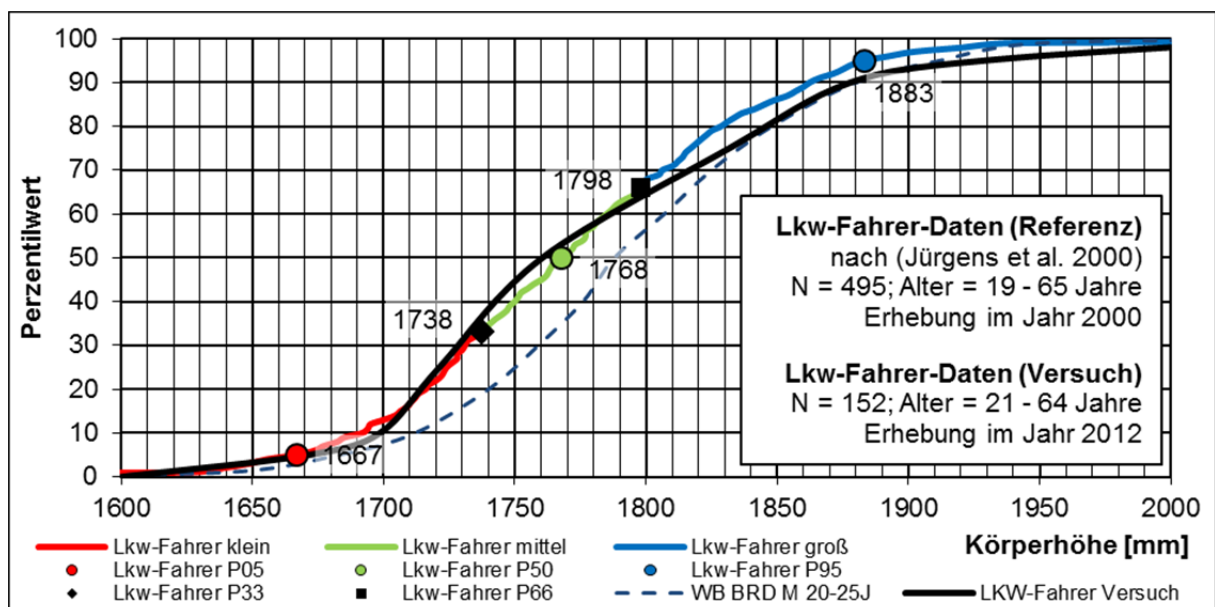


Abbildung 3-25: Körperhöhenverteilung der Stichprobe N = 152 (vgl. Jürgens 1999 B-1.2; Jürgens et al. 2000 S. 30)

Die Klassifizierung der Stichprobe nach der Stammlänge ist in Abbildung 3-26 visualisiert. Der Mittelwert liegt bei 914 mm und die Verteilung ist nach links versetzt. 48% der Probanden haben eine kurze, 28% eine mittlere und 24% eine lange Stammlänge. In Bezug auf die Referenzmessung ist die Stammlängenverteilung in Abbildung 3-27 im Mittel um 24 mm nach links verschoben. Obwohl die



Probanden des Versuchs im Durchschnitt eine kürzere Stammlänge als die Versuchsteilnehmer der Referenzmessung aufweisen, werden alle Stammlängengruppen in ausreichendem Maße repräsentiert. In den Stammlängenverteilungen der Teilstichproben (V1 bis V3) kann kein Unterschied festgestellt werden.

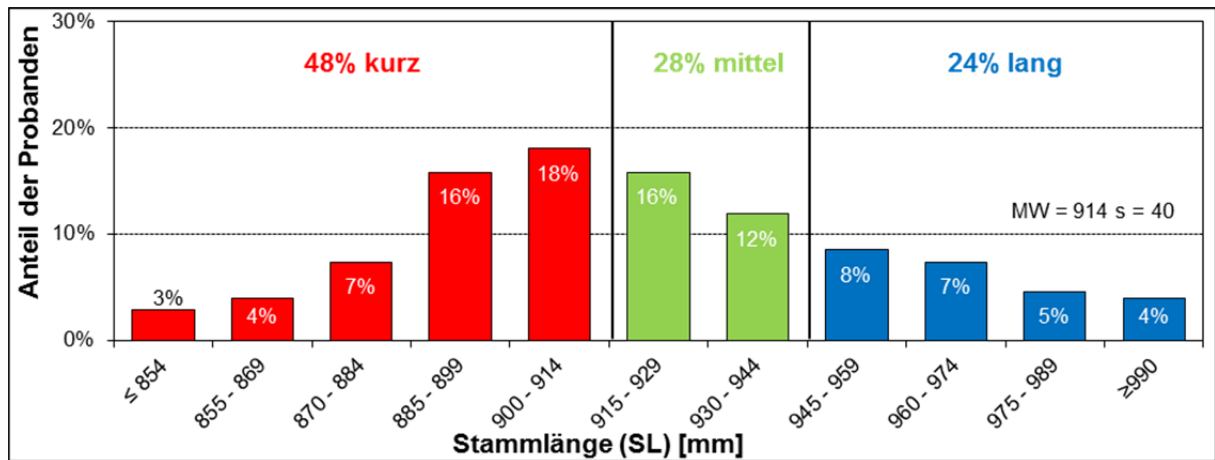


Abbildung 3-26: Klassifizierung der Stichprobe N = 152 nach den Stammlänge

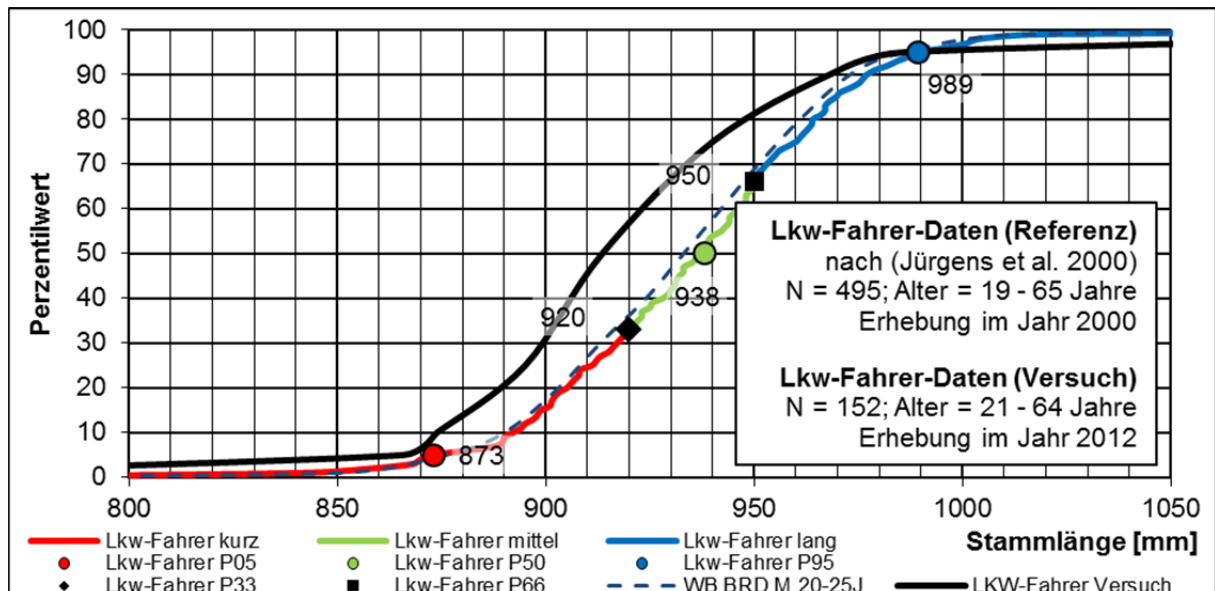


Abbildung 3-27: Stammlängenverteilung der Stichprobe N = 152 (vgl. Jürgens 1999 B-1.2; Jürgens et al. 2000 S. 30)

Mit der Taillenumfangsverteilung wird nun abschließend die Abdeckung der Faktorstufen der unabhängigen Variable B beschrieben. Wie in Abbildung 3-28 dargestellt ist, können die Probanden der Stichprobe zu 18% der schlanken, zu 34% der mittleren und zu 48% der korputenten Körpermaßgruppe (KMG) zugeteilt werden. Die Taillenumfangsverteilung in Abbildung 3-29 ist nach rechts (zu größeren Umfangswerten hin) mit einer Mittelwertdifferenz (MWD) von 44 mm verschoben. Dieser Unterschied lässt sich durch populationsabhängige Effekte erklären. Die Lkw-Fahrerpopulation ist im Vergleich zur Gesamtbevölkerung nur eine kleine Auswahl und daher größeren Schwankungen unterworfen (vgl. Jürgens et al. 2000 S. 1). Zwischen der Referenzmessung und dem durchgeführten Fahrversuch liegt eine Zeitspanne von 12 Jahren innerhalb derer sich die Zusammensetzung und die Merkmale der Lkw-Fahrer-Population verändern konnten. Als ein Effekt ist hier die Akzeleration des Taillenumfangs zu nennen (vgl. Kaiser 2011 S. 13). Alle Körpermaßgruppen werden jedoch in ausreichendem Maße repräsentiert. Die Teilstichproben unterscheiden sich nicht untereinander.

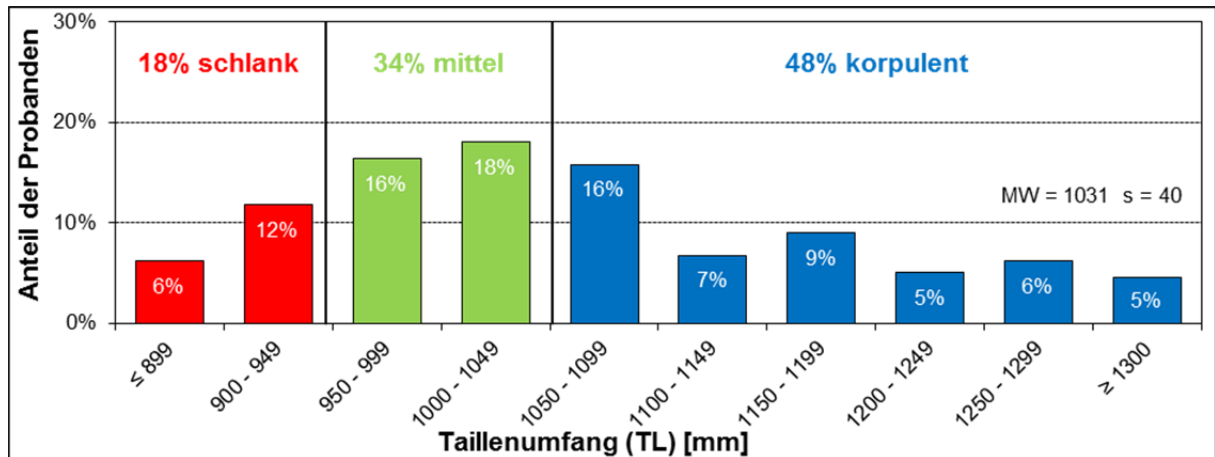


Abbildung 3-28: Klassifizierung der Stichprobe N = 152 nach dem Taillenumfang

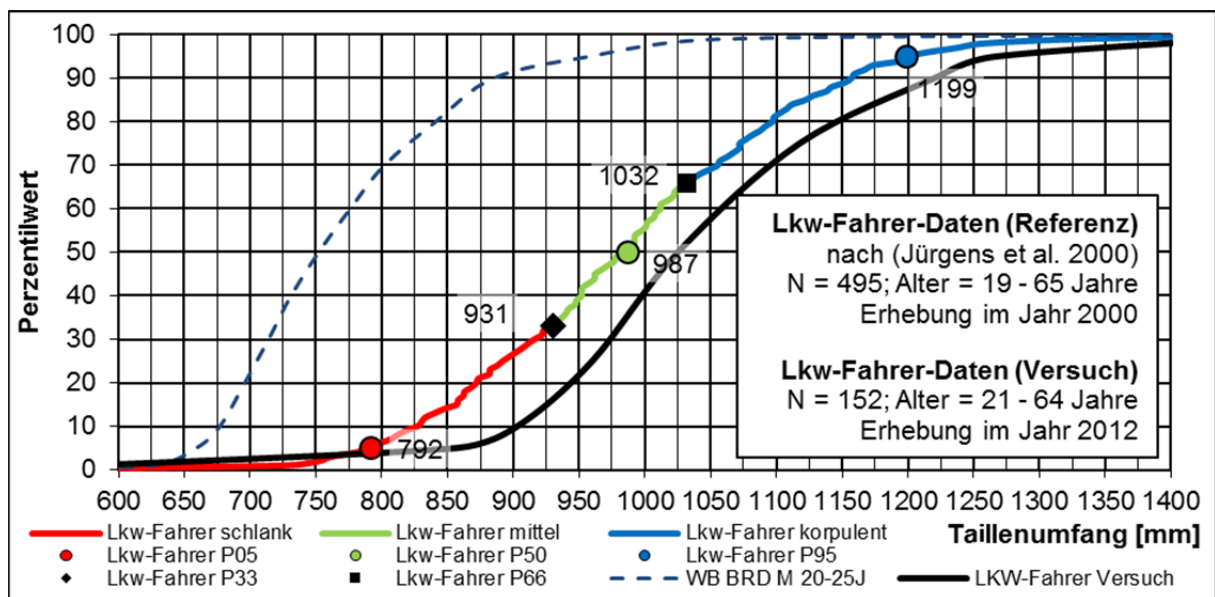


Abbildung 3-29: Taillenumfangsverteilung der Stichprobe N = 152 (vgl. Jürgens 1999 B-1.2; Jürgens et al. 2000 S. 30)

### 3.4 Messtechnik

Zur Messung der in Kapitel 3.2 beschriebenen abhängigen Variablen werden unterschiedliche Messsysteme benötigt. Hierbei kann zwischen den Messsystemen zur Erfassung der statischen und der dynamischen Werte unterschieden werden. Nach der Messtechnikauswahl wird in diesem Kapitel die Integration der einzelnen Komponenten ins Versuchsfahrzeug und die notwendige Datenaufzeichnungsarchitektur beschrieben.

#### 3.4.1 Messtechnikauswahl

Zur Messung der anthropometrischen Maße und der statischen Körperhaltungen gibt es etablierte Methoden und Messmittel (vgl. Jürgens 1999 B-1.2; Reed et al. 2000b S. 5 & 8). Um die Vergleichbarkeit mit vorausgegangenen Referenzmessungen sicherzustellen wird dieselbe Messmethode verwendet und es findet keine eigenständige Auswahl der Messtechnik statt. Die Körperhöhe und die Stammlänge werden mittels des Anthropometers und eines standardisierten Messtuhls (vgl. Jürgens et al. 2000 S. 10) bestimmt. Der Taillenumfang wird mit einem Maßband und das Gewicht mittels einer geeichten Körperwaage ermittelt. Zur Messung der fahrerindividuellen

statischen Körperhaltung im Fahrzeug wird ein Faro-Messarm, der für verschiedene Messbereiche mit unterschiedlicher Achsenanzahl angeboten wird (vgl. Abbildung 3-30; Reed et al. 2000b S. 5 & 8), eingesetzt. Um den Messarm auch zur Bestimmung der statischen Fahrzeugpunkte (vgl. Kapitel 3.2.3; Lehto Way & Reed 2003 S. 2 & 5)) nutzen zu können wurde der Platinum 10 ft. mit sieben Achsen ausgewählt. Die spezifizierte Messgenauigkeit ist mit  $\pm 0,052$  mm für die Anwendung während des Versuchs ausreichend.



Performance Specifications						
Model (Measuring Range) axis	Single Point Articulation Performance Test (Max-Min)/2		Volumetric Maximum Deviation		FaroArm Weight	
	6	7	6	7	6	7
Platinum 4 ft. (1.2 m)	$\pm 0.0005$ in. ( $\pm 0.013$ mm)	$\pm 0.0007$ in. ( $\pm 0.018$ mm)	$\pm 0.0007$ in. ( $\pm 0.018$ mm)	$\pm 0.0010$ in. ( $\pm 0.025$ mm)	20.0 lbs. (9.10 kg)	20.5 lbs. (9.30 kg)
Platinum 6 ft. (1.8 m)	$\pm 0.0008$ in. ( $\pm 0.020$ mm)	$\pm 0.0010$ in. ( $\pm 0.026$ mm)	$\pm 0.0011$ in. ( $\pm 0.029$ mm)	$\pm 0.0015$ in. ( $\pm 0.037$ mm)	20.5 lbs. (9.30 kg)	21 lbs. (9.30 kg)
Platinum 8 ft. (2.4 m)	$\pm 0.0010$ in. ( $\pm 0.025$ mm)	$\pm 0.0012$ in. ( $\pm 0.030$ mm)	$\pm 0.0014$ in. ( $\pm 0.036$ mm)	$\pm 0.0017$ in. ( $\pm 0.043$ mm)	21.0 lbs. (9.5 kg)	21.5 lbs. (9.75 kg)
Platinum 10 ft. (3.0 m)	$\pm 0.0017$ in. ( $\pm 0.043$ mm)	$\pm 0.0020$ in. ( $\pm 0.052$ mm)	$\pm 0.0024$ in. ( $\pm 0.061$ mm)	$\pm 0.0029$ in. ( $\pm 0.073$ mm)	21.5 lbs. (9.75 kg)	22 lbs. (9.98 kg)
Platinum 12 ft. (3.7 m)	$\pm 0.0024$ in. ( $\pm 0.061$ mm)	$\pm 0.0029$ in. ( $\pm 0.073$ mm)	$\pm 0.0034$ in. ( $\pm 0.086$ mm)	$\pm 0.0041$ in. ( $\pm 0.103$ mm)	22.0 lbs. (9.98 kg)	22.5 lbs. (10.21 kg)

Abbildung 3-30: Spezifikation der Varianten des Platinum FaroArms (FARO 2007 S. 1 f.)

Zur Bestimmung der dynamischen Sichtdaten innerhalb von Feldversuchen eignen sich fahrzeugfeste optische Messsystem am Besten (vgl. Kapitel 2.3.2). Eine Zusammenstellung aller verfügbaren Systeme zur Sichtdatenerhebung ist im Anhang A2 zu finden. Auf eine Beschreibung dieser Systeme wird daher verzichtet. Um die in Kapitel 3.2.3 beschriebenen dynamischen Messwerte aufzuzeichnen wurde das in Abbildung 3-31 dargestellte Messsystem „faceLAB5“ von Seeing Machines (vgl. FaceLAB5 2009a S. 5 ff.) eingesetzt.

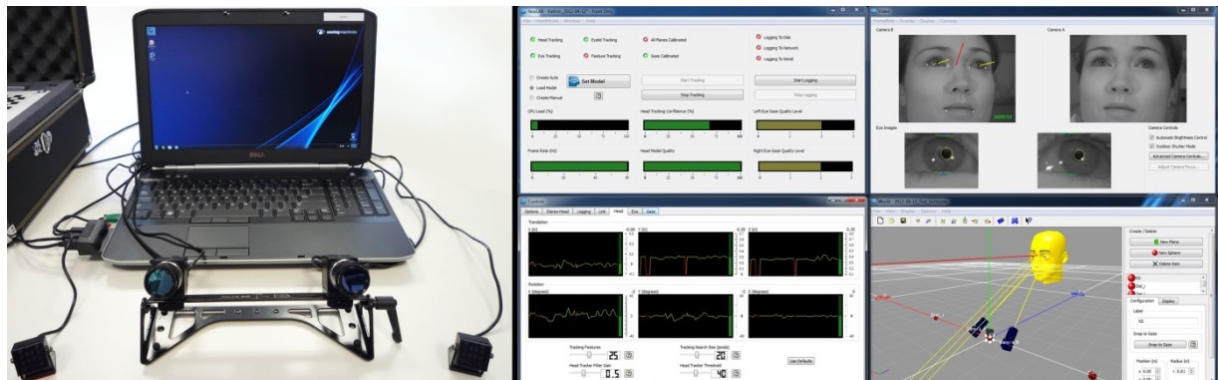


Abbildung 3-31: Systemkomponenten eines faceLAB5 Systems (vgl. FaceLAB5 2009a S. 5 ff.)

Ein faceLAB5 System besteht aus zwei Kameras, zwei Infrarotstrahlern und einem Computer inklusive Software. Ein Vorteil dieses Systems liegt darin, dass es ohne störende Marker oder Sensoren am Fahrerkopf auskommt. Es wird die Kopfposition, die Augenposition und die Sichtstrahlausrichtung durch Auswertung der Videobilder beider Kameras, die mit definiertem Abstand und Winkel zueinander angeordnet sind, ermittelt. Dadurch ist die Beeinflussung des Probanden während der Datenaufzeichnung auf ein Minimum reduziert.

Zur Bestimmung der Kopf- und Augenposition werden individuelle Referenzpunkte im Gesicht jedes Probanden, wie die Mundwinkel (4 & 5) oder die Eckpunkte der Augenlider (0 bis 3) eingesetzt (vgl. Abbildung 3-32). Je mehr dieser Punkte vom Stereokamerasystem erfasst werden, desto stabiler und genauer ist die Messung der Augpunkte (600 & 700). In Abbildung 3-32 sind ebenfalls das kopffeste Koordinatensystem, eine Auswahl weiterer gesichtsfester Referenzpunkte und die Spezifikationskennwerte des faceLAB5-System dargestellt.

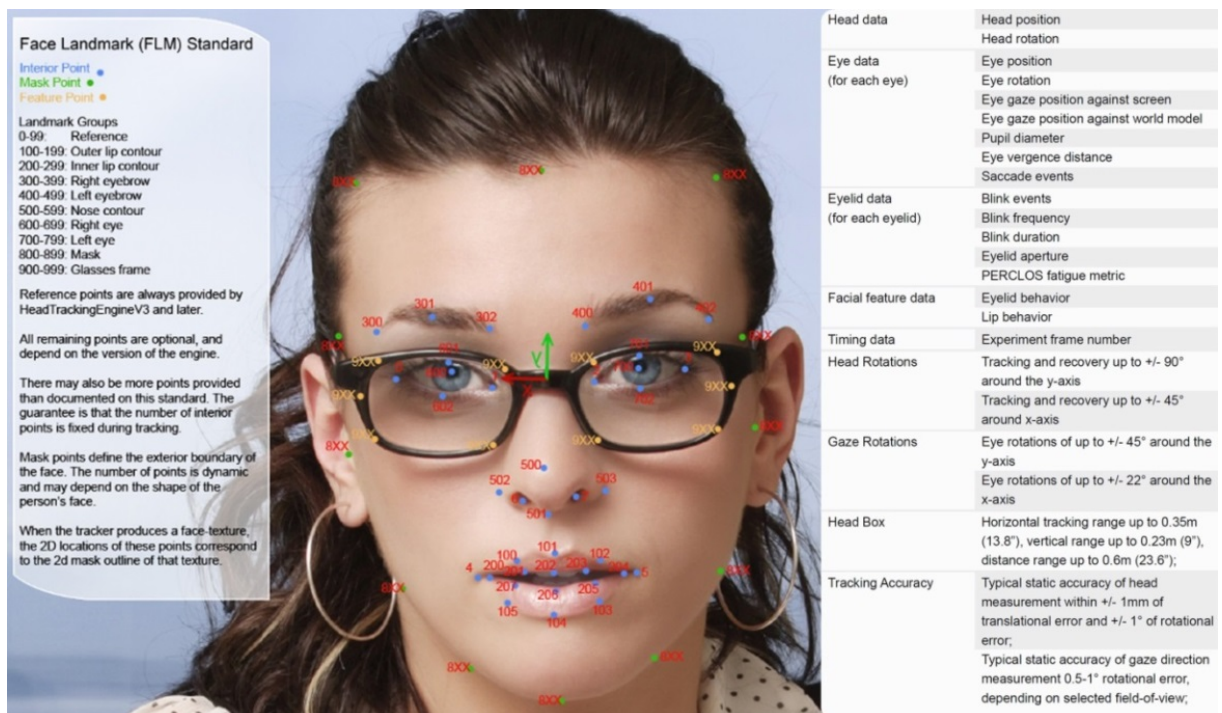


Abbildung 3-32: Referenzpunkte des Gesichts und Spezifikationskennwerte des Messsystems faceLAB5 (FaceLAB5 2009a S. 25 & FaceLAB5 2009b S. 2)

Durch die Öffnungswinkel und die Brennweite der Kameraobjektive wird das Aufzeichnungsvolumen eines fahrzeugfesten optischen Messsystems innerhalb des Fahrerhauses festgelegt. Verlässt die Versuchsperson durch extreme Kopfbewegungen diesen Messraum oder ist das Gesicht durch eine Kopfdrehung, wie sie beim Blick in den Spiegel üblich ist, nicht mehr frontal zu detektieren, können keine exakten Augpunktlagen bestimmt werden. Diesem Nachteil eines fahrzeugfesten Systems kann mit der Kombination mehrerer Systeme begegnet werden. In Abbildung 3-33 ist ein aus drei Einzelsystemen bestehendes Gesamtsystem dargestellt. Durch die Verschaltung der Einzelsysteme wird die Kopf- und Augpunktlage jeweils vom bestpositionierten System erfasst und es werden selbst bei schnellen Kopfbewegungen und -drehungen kontinuierlich Messdaten geliefert. Die Möglichkeit der einfachen Verlinkung, die damit verbundene Erweiterung des Messvolumens und die Funktionalität zur gleichzeitigen Aufzeichnung von Augpunktlage und Sichtstrahlorientierung mit einer Abtastrate von 60 Hz sind ausschlaggebend für die Wahl der faceLAB5 Systeme.

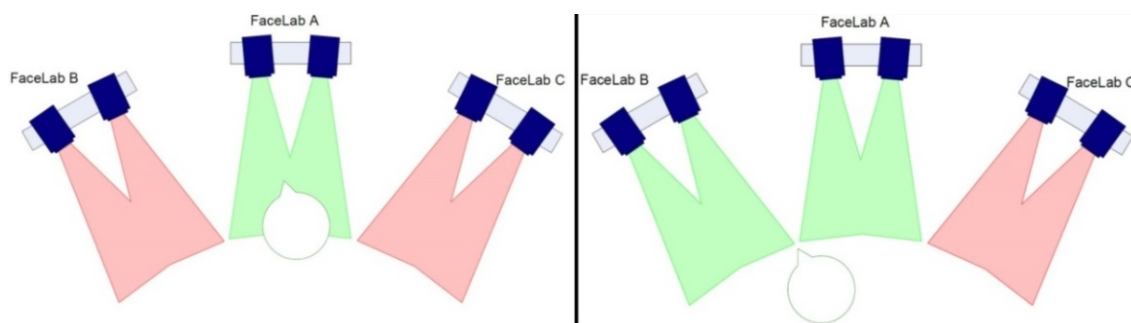


Abbildung 3-33: Gesamtsystem bestehend aus drei Einzelsystemen (FaceLAB5 2008 S. 12 f.)

Nach der Aufzeichnung der Messsignale im Fahrzeug sollen Datensätze, die sowohl die dynamischen Sichtdaten als auch die dynamischen Fahrzeugdaten zu jedem Messpunkt zeitsynchron beinhalten, vorliegen. Die Fahrzeugsignale können vom CAN-Bus abgegriffen und mithilfe eines Datenloggers aufgezeichnet werden. In Abbildung 3-34 ist der ausgewählte Datenlogger GL3100 der Firma Vector dargestellt. Um den Aufwand und die Risiken einer nachträglichen Synchronisation der Fahrzeug- und Sichtdaten nicht eingehen zu müssen, werden die Sichtdaten ebenfalls auf den CAN-Bus gelegt und in einem gemeinsamen Datensatz mit den Fahrzeugdaten aufgezeichnet. Der ausgewählte Datenlogger kann dazu Signale von 3 unterschiedlichen CAN-Bussen parallel aufzeichnen. Des



Weiteren werden die über eine externe GPS-Antenne aufgenommenen Positionssignale ebenfalls gespeichert. Die Integration der ausgewählten Messtechnik-Komponenten im Versuchsfahrzeug wird im nächsten Kapitel beschrieben.

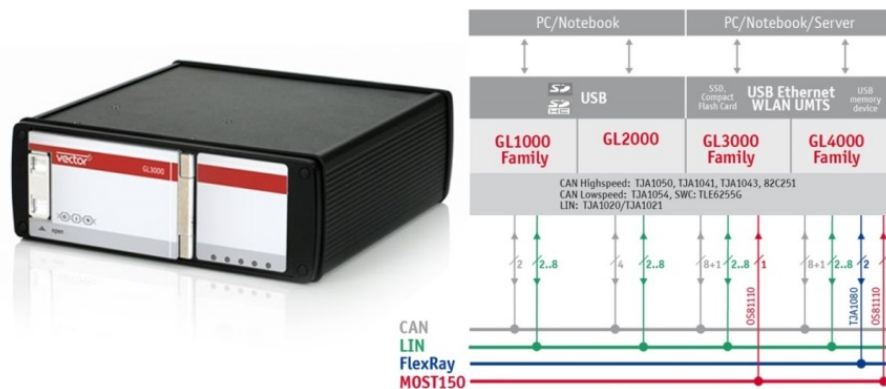


Abbildung 3-34: Ausgewählter Datenlogger GL3100 der Firma Vector zur Aufzeichnung der Sicht- und Fahrzeugdaten im Fahrzeug (Vector 2013 S. 4 & 14)

### 3.4.2 Messtechnikintegration im Versuchsfahrzeug

Um die Augpunktlagen und Sichtstrahlorientierungen während der Interaktion im relevanten Sichtbereich, der sich vom linken (HSL) bis zum rechten Hauptspiegel (HSR) erstreckt, kontinuierlich aufzeichnen zu können, werden die drei faceLAB5 Stereokamera-Systeme um den Fahrerplatz herum angeordnet (vgl. Abbildung 3-35). Der FaroArm wird zwischen den Sitzen mit der Rohbaustruktur des Fahrzeugs verschraubt. Durch diese Position können mit dem ausgewählten Platinum 10 ft. FaroArm alle fahrzeugfesten Messpunkte auf den Spiegeln, dem Lenkrad und dem Sitz vom Versuchsleiter in Kabinenkoordinaten gemessen werden. Auch die elf Körperpunkte zur Dokumentation der statischen Körperhaltung werden aus dieser Position mit der Messspitze erreicht. Die Positionierung der faceLAB5 Systeme und des FaroArms wurde vor dem Aufbau des Versuchsfahrzeugs mittels CAD-Simulation abgesichert. Von dieser Simulation wurden die konstruktiven Umfänge zur Integration im Fahrzeug abgeleitet.

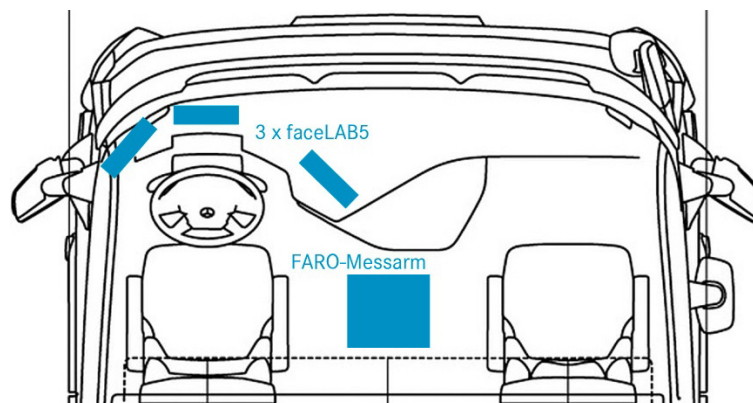


Abbildung 3-35: konzeptionelle Anordnung der Messtechnikkomponenten im Versuchsfahrzeug

In Abbildung 3-36 ist die Unterkonstruktion zur Integration des Messarms im Fahrzeug dargestellt. Die Aluminiumprofile werden an den Sitzanbindungspunkten mit dem Fahrerhausboden verschraubt und bieten mit der im Bild gelb eingefärbten Messplatte eine solide Basis für die exakte Messung statischer Daten. Der FaroArm wird auf dieser in der Fahrzeugmitte positionierten Messplatte verschraubt und durch einen Einmessvorgang mit rohbaufesten Messpunkten auf das Kabinen-Koordinatensystem (KKOS) referenziert. Durch diesen Vorgang kann jeder Messpunkt im Fahrzeug oder an den Spiegeln direkt im Ziel-Koordinatensystem gemessen werden. Die Messungen im Fahrzeug werden nur bei Fahrzeugstillstand durchgeführt. Vor Fahrtbeginn wird der FaroArm zur Beifahrerseite hin in die Halteschalen abgelegt und verzurrt (vgl. Abbildung 3-36; Bothe et al. 2012a S. 1644). Damit ist eine Beeinträchtigung des Fahrers während der Fahraufgabe ausgeschlossen.

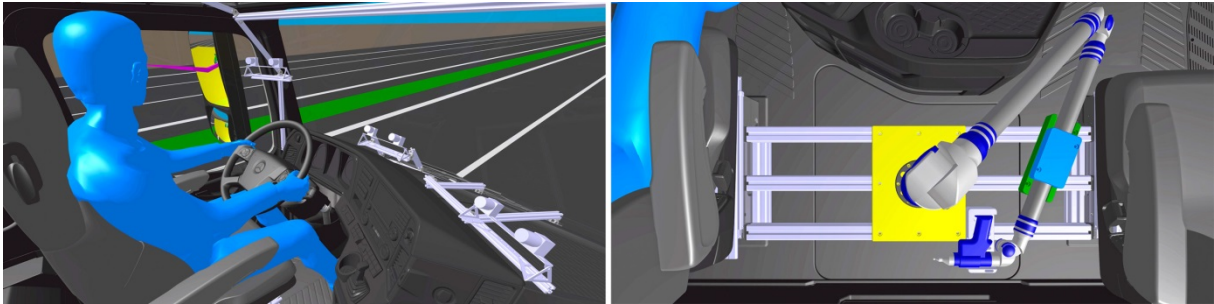


Abbildung 3-36: Integration des faceLAB5-Systems (links) und des FaroArms (rechts) im Fahrerhaus der Versuchsfahrzeuge (Bothe et al. 2012a S. 1644 f.)

Der Messvorgang mit dem FaroArm ist in Abbildung 3-37 dokumentiert. Mit dem Pistolengriff wird die Messspitze vom Versuchsleiter zum Messpunkt geführt und die Messung mittels des vom Zeigefinger zu bedienenden Tasters ausgelöst. Im linken Teilbild ist die Messung des Schulterpunktes (KP04) zur Dokumentation der fahrerindividuellen statischen Sitzhaltung abgebildet. Im zweiten Teilbild wird der mittlere Spiegelpunkt des Hauptspiegels links (FP02) gemessen. Mit der im rechten Teilbild dargestellten Messung wird der Lenkradpunkt (FP13) dokumentiert. Aufgrund der Exzentrizität moderner Lenkräder darf diese Messung nur ohne Lenkradeinschlag (Steerangl = 0°) durchgeführt werden. Die Geradeausstellung des Lenkrads wird über die beiden lenkrad- und lenksäulenfesten Pfeilspitzen kontrolliert.

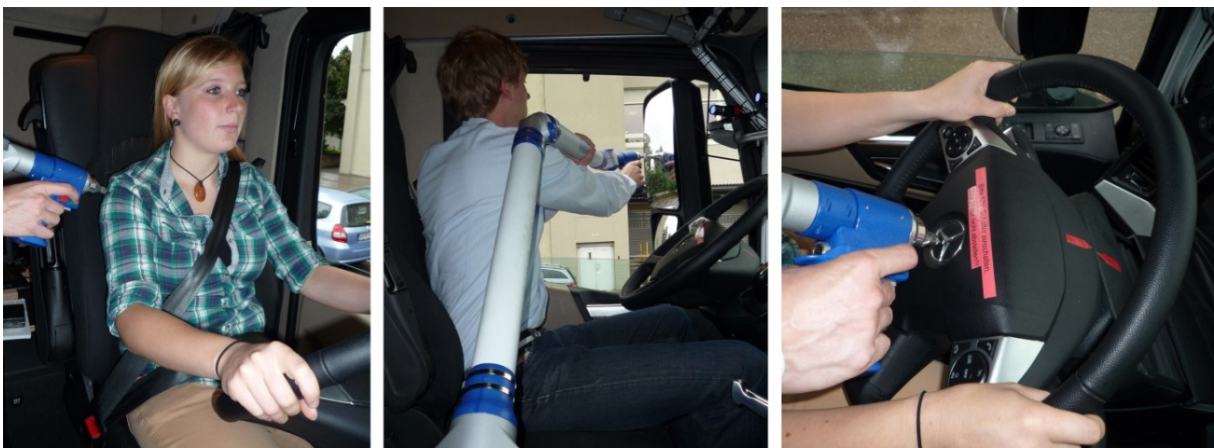


Abbildung 3-37: Einsatz des FaroArms zur Bestimmung statischer Körper- und Fahrzeugpunkte

Die Simulation zur Findung der optimalen Lage und Ausrichtung aller drei faceLAB5 Systeme ist ebenfalls in Abbildung 3-36 gezeigt. Die Herausforderung liegt darin durch die Positionierung das Gesamtaufnahmenvolumen so groß wie nötig, die Verdeckung der direkten Sicht jedoch so gering wie möglich zu halten. Die Aufnahmebereiche der Einzelsysteme müssen sich partiell überschneiden um ein kontinuierliches Messsignal zu liefern (vgl. FaceLAB5 2008 S. 5 f. & Bothe et al. 2012a S. 1645.). Das linke und das rechte faceLAB5 System sind so nah wie möglich in Richtung der Hauptspiegel zu positionieren. Damit wird eine optimierte Aufzeichnungsqualität bei den Blicken in die Spiegel erzielt.

Zur stabilen Verortung der Messsysteme wurde ein sichtoptimal positionierter Rahmen in das Versuchsfahrzeug eingebracht. Die steife Konstruktion aus Aluminiumprofilen wird an rohbaufesten Punkten am Fahrerhaus und dem Querträger der Instrumententafel verankert und verspannt. Die Einzelsysteme sind auf diesem Rahmen fest verschraubt, können jedoch durch eine Rotation um die Querachse auf die fahrerindividuelle Augpunktlage eingestellt werden. Dazu wird an jedem System eine Schnellspannvorrichtung, die eine Ausrichtung der Systeme auf die mittlere Augpunktlage der Fahrer zulässt, berücksichtigt. Die Infrarotstrahler sind ebenfalls am Rahmen verortet und in Richtung Fahreraugpunkt ausgerichtet. Um auch bei Probanden, die während der Fahrt eine Brille tragen, ein optimales Messergebnis zu erreichen können die sechs verbauten Infrarotquellen unabhängig voneinander angesteuert werden.



Abbildung 3-38: Integration der faceLAB5-Systeme im Versuchsfahrzeug

Um den Fahrer bei der Aufzeichnung der dynamischen Sichtdaten so wenig wie möglich zu beeinflussen, sind die Rechner zum Betrieb der Messtechnik hinter dem Fahrer- und Beifahrersitz untergebracht. Dazu wurde das Bett im Fernverkehrsfahrerhaus entfernt und durch eine Platte auf und unter der die Messtechnikkomponenten verbaut werden ersetzt (vgl. Abbildung 3-38). Zum Betrieb der faceLAB5 Systeme sind drei Rechner notwendig. Mit dem vierten Computer wird die Aufzeichnung situationsabhängig gestartet. Da während der Messfahrt alle Systeme vom auf dem Beifahrersitz sitzenden Versuchsleiter überwacht und bedient werden müssen, wurden zusätzlich ein KVM-Switch, ein weiterer Monitor und zusätzliche Eingabegeräte ins Versuchsfahrzeug eingebaut. Dadurch ist es für den Versuchsleiter möglich sich mit Hilfe des beifahrerseitig installierten User-Interfaces auf jedes Einzelsystem aufzuschalten. Somit können während des Messbetriebs die Aufzeichnungsphasen vom Probanden unbemerkt gestartet, überwacht und gestoppt werden.

### 3.4.3 Datenaufzeichnungsarchitektur

Um ein Gesamtsystem mit mehreren faceLAB5 Systemen aufzubauen, werden diese, wie in Abbildung 3-39 dargestellt, miteinander gekoppelt (vgl. FaceLAB5 2008 S. 5 f.). Die Aufnahmebereiche müssen sich dazu partiell überschneiden damit bei einer durch die Kopfdrehung ausgelösten Übergabe von System A zu System B (vgl. Abbildung 3-33) das Gesicht der Versuchsperson von beiden Systemen erfasst wird. Zwischen den Rechnern ist per UDP eine Kommunikation aufgebaut, wobei einer der drei Computer als Master fungiert. Die beiden Slave-Rechner schicken kontinuierlich ihre Messdaten und die Klassifizierung der Qualität dieser Daten an den Master-Computer. Die Systeme sind auch optisch miteinander verlinkt (vgl. FaceLAB5 2008 S. 1 ff.). Das heißt das Master-System hat durch den Kalibrierungsvorgang Informationen darüber, wo sich die anderen Messsysteme befinden und wie diese ausgerichtet sind. Dadurch können die Messdaten der Slave-Systeme in das Mess-Koordinatensystem des Master-Systems umgerechnet werden. Vom Master-System werden die Daten mit der höchsten Qualität ausgewählt und an den CAN-Gateway gesendet.

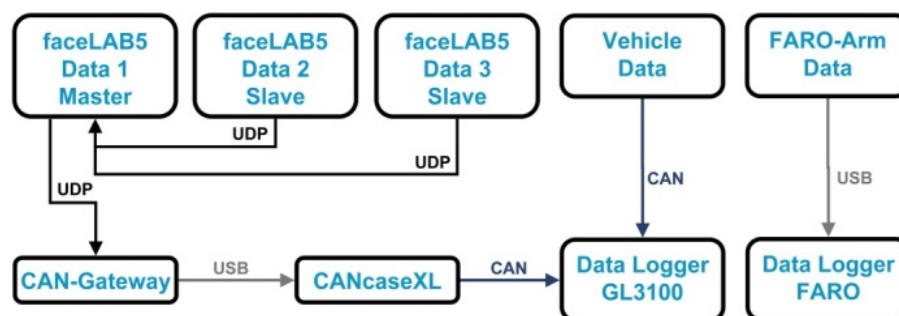


Abbildung 3-39: Architektur der Datenaufzeichnung im Fahrzeug (Bothe et al. 2012a S. 1644)

Durch das CANcaseXL werden die Sichtdaten auf den Fahrzeug-CAN gelegt. Die Fahrzeugdaten, die zeitsynchron zu den Sichtdaten aufgezeichnet werden sollen, liegen ebenfalls auf einem Fahrzeug-CAN. Der Datenlogger GL3100 greift beide Datenströme parallel von den CAN-Bussen ab und speichert sie in eine Messdatendatei ab. Durch dieses Vorgehen ist sichergestellt, dass zu jedem Messzeitpunkt die dynamischen Sichtdaten und Fahrzeugparameterdaten in zeitsynchroner Form vorliegen.



Die Messdaten des FaroArms werden ebenfalls mit einem Datenlogger aufgezeichnet. Dazu wird ein autarkes System aufgebaut. Die beiden Messdatensätze werden bei der Datenanalyse zusammengeführt. Sie müssen nicht synchronisiert werden, da die statischen Messungen im Versuch nur zweimal und jeweils bei Fahrzeugstillstand aufgenommen werden. Die Erhebungszeitpunkte sind dokumentiert und die statischen Daten werden während der Aufzeichnung der dynamischen Daten konstant gehalten.

### 3.5 Messvorbereitung und Datenerhebung

Um mit dem beschriebenen Messsystem in der anspruchsvollen Messumgebung eines Feldversuchs optimale Ergebnisse erzielen zu können, müssen während der Messvorbereitung und der Datenerhebung einige Optimierungen vorgenommen werden. Das innerhalb der Pretests zu diesem Versuch entwickelte Vorgehen wird in den folgenden Kapiteln beschrieben.

#### 3.5.1 Probandenindividuelle Messsystemkalibrierung

Zur Findung der fahrerindividuellen Sitzhaltung wird in diesem Versuch eine Eingewöhnungsfahrt durchgeführt (vgl. Kapitel 3.3.3; Manary et al. 1998 S. 5). Nach dieser Eingewöhnungsphase werden vom Fahrer letzte Feinjustierungen an den Sitzeinstellungen vorgenommen und er nimmt die bevorzugte Fahrhaltung ein. Es hat sich als zielführend erwiesen zu diesem Zeitpunkt das gesamte Messsystem optimal auf die Augpunktlage des Probanden einzustellen. Das faceLAB5 System bietet zur Messung im Fahrzeug drei Objektivpaare mit unterschiedlicher Brennweite (vgl. Abbildung 3-40). Für Augpunktlagen mit großer Entfernung zum Messsystem werden Objektive mit großer Brennweite verbaut. Bei kleinen Abständen zum Messsystem werden weitwinklige Optiken eingesetzt. Die ausgewählten Objektive jedes Messsystems werden auf die probandenindividuelle Augpunktlage ausgerichtet und scharf gestellt. Durch dieses Vorgehen ist gewährleistet, dass der Proband im aufgenommenen Bildausschnitt optimal eingepasst ist und durch die Optimierung der Brennweite auch bei Veränderung der Längsposition während den dynamischen Situationen kontinuierlich Daten geliefert werden. Das Messsystem wird nachdem alle Einstellungen vorgenommen wurden kalibriert.

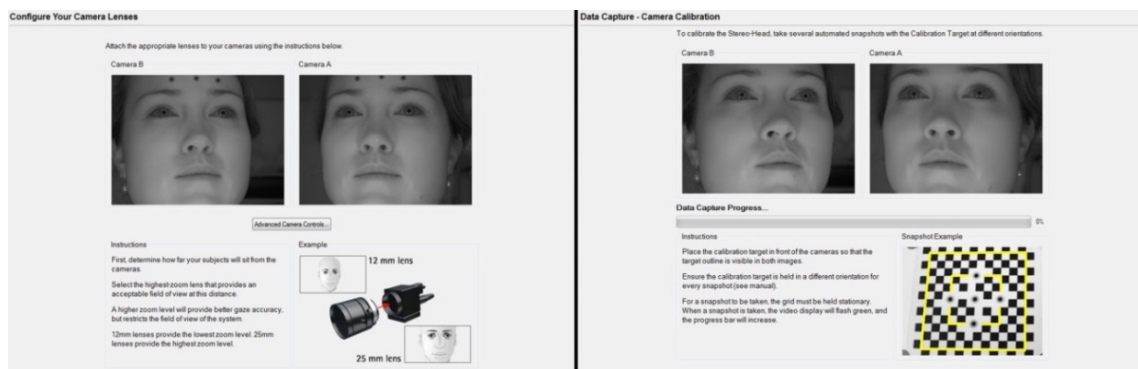


Abbildung 3-40: Auswahl und Ausrichtung der Objektive auf die probandenindividuelle Augpunktlage (vgl. FaceLAB5 2009a S. 59 ff.)

In jedem der drei Messsysteme wird ein probandenindividuelles Referenzmodell des Gesichts angelegt (vgl. Abbildung 3-41; FaceLAB5 2009a S. 54 ff.). Dazu werden Aufnahmen aus der rechten und der linken Kamera erzeugt. Auf jeder der beiden Aufnahmen werden nun manuell die Referenzpunkte der Mundwinkel und der Augenlieder gesetzt. Es ist darauf zu achten, dass exakt dieselben Punkte im linken und rechten System referenziert werden.

Im nächsten Schritt werden weitere Referenzpunkte im Gesicht des Probanden markiert. Dies sind beispielsweise Punkte an den Augenbrauen und an der Nase. Um exakte Messergebnisse zu erzielen sollten diese Punkte möglichst kontrastreich, kopffest und aus allen Blickwinkeln sichtbar sein. Da Punkte mit diesen Eigenschaften insbesondere bei Probanden mit hellen Haaren begrenzt sind, werden mit einem schwarzen Kosmetikstift zusätzliche Farbmarkierungen auf die Probandenstirn aufgebracht (vgl. Abbildung 3-41). Durch die Verwendung der drei Markierungen kann die Aufzeichnungsqualität in dynamischen Situationen erheblich gesteigert werden. Die Position wurde



ausgewählt, da sie aus allen Kamerarichtungen detektiert werden kann und die Kopfhaut auf der Mitte der Stirn recht unbeeinflusst von der Gesichtsgestik ist. Nun wird die Qualität der Gesichtserkennung und Kopfpositionsmessung in allen Systemen überprüft und gegebenenfalls durch Wiederholung der vorangegangenen Schritte optimiert.

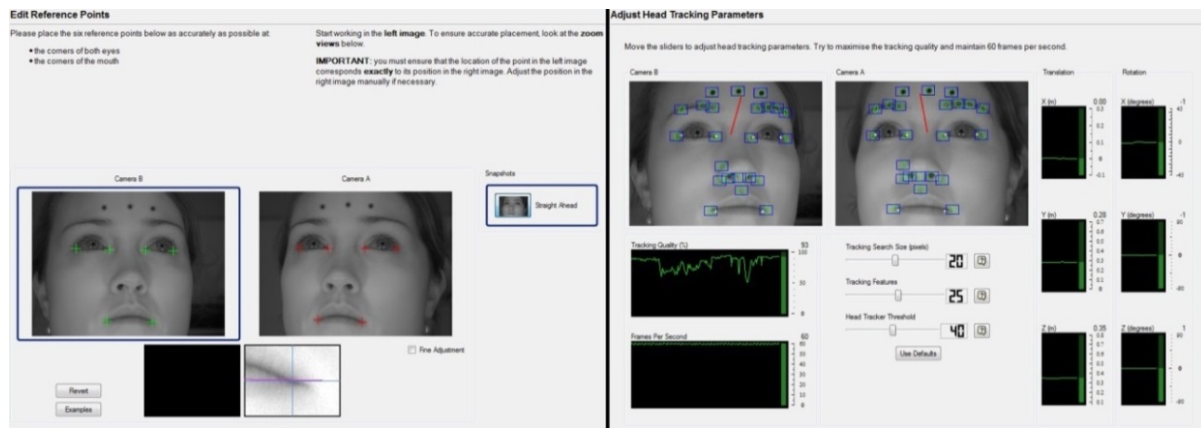


Abbildung 3-41: Festlegung der probandenindividuellen Referenzpunkte und Überprüfung der Qualität des Head-Tracking (vgl. FaceLAB5 2009a S. 54 ff.)

In einem weiteren Schritt wird die Blickrichtungserfassung konfiguriert und kalibriert (vgl. Abbildung 3-42; FaceLAB5 2009a S. 59 ff.). Je nach Probandentyp, Brillennutzung und Umgebungslichtverhältnissen ist eine Messung mit oder ohne Infrarotstrahler sinnvoll. Bei Brillenträgern kann die Verwendung der infraroten Zusatzbeleuchtung problematisch sein, wenn das Lichtsignal im Bereich der Pupille im Brillenglas gespiegelt und von der Kamera detektiert wird. Dieser Effekt kann durch die Verwendung von seitlich einstrahlenden Infrarotleuchten, die durch den Versuchsaufbau gezielt ansteuerbar sind (vgl. Abbildung 3-38), stark minimiert werden. Bei intensivem Lichteintrag ins Fahrerhaus ist die Nutzung des Infrarotmodus zu verwenden. Abhängig von den Kontrastverhältnissen zwischen Pupille, Iris und Bindehaut kann zwischen zwei Modi der Augpunktdetektion unterschieden werden. Im ersten wird der Umriss der Pupille, im zweiten der Umriss der Iris detektiert. Hier ist die Detektion der Iris zu präferieren.

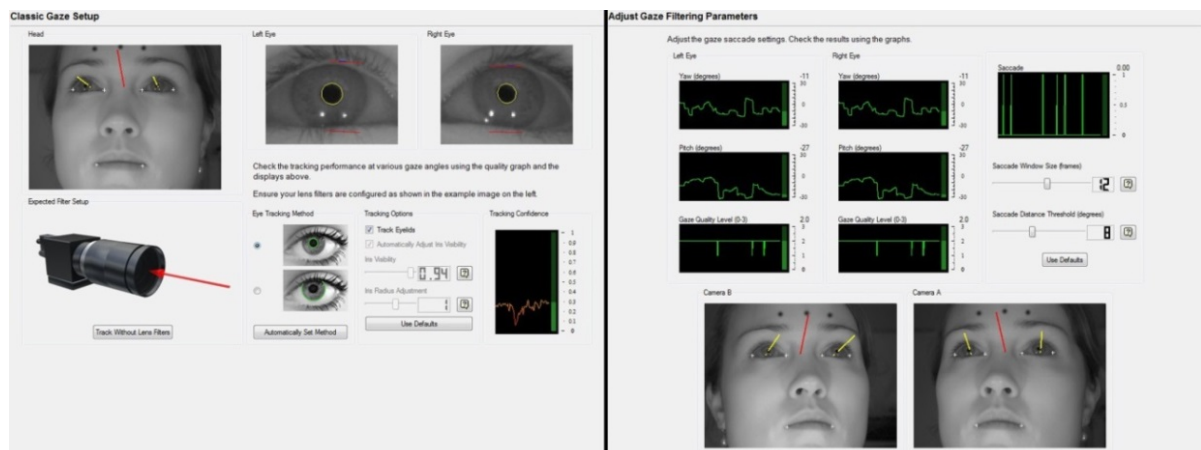


Abbildung 3-42: Auswahl der Methode und Einstellung der Parameter des Gaze-Tracking (vgl. FaceLAB5 2009a S. 59 ff.)

Es folgt die Kalibrierung der Sichtstrahlorientierung. Dazu wird abwechselnd in die rechte und die linke Kamera jedes Einzelsystems gesehen. Während in die jeweilige Kamera geblickt wird, führt der Versuchsleiter die Kalibrierung durch. Insgesamt wird die Kalibrierung somit an sechs Kameras, die an unterschiedlichen definierten Orten im Fahrerhaus platziert sind, vorgenommen. Die Kalibrierung des Gesamtsystems wird durch die Blicke in definierte Sichtziele im linken und rechten Hauptspiegel sowie im Kombiinstrument überprüft. Dazu ist im Blickerfassungssystem ein dreidimensionales Abbild der Blickziele im Fahrerhaus hinterlegt und es kann ein Vergleich zwischen real vorgegebenen und vom System detektierten Blickziel vorgenommen werden. Das Dynamikverhalten der Blickrichtungsdetektion wird abschließend bewertet (vgl. Abbildung 3-42 rechts) und ggf. optimiert.

### 3.5.2 Situationsabhängige Datenaufzeichnung

Die dynamischen Sicht- und Fahrzeugdaten werden nicht kontinuierlich über den gesamten Versuchszeitraum erfasst, sondern gezielt vom Versuchsleiter (VL) an im Vorhinein definierten Teilabschnitten der Versuchsstrecke aufgezeichnet (vgl. Kapitel 3.3.4). Der Proband wurde vom Versuchsleiter vor Fahrtbeginn auf die hohe Priorität der Aufzeichnung von realistischem Sichtverhalten hingewiesen. Daher wurde vereinbart, dass die Kommunikation zwischen Proband und Versuchsleiter während der Fahrt auf ein Minimum beschränkt wird. Sollte doch ein Gespräch stattfinden muss die Versuchsperson weiterhin das situationsabhängige Sichtverhalten durchführen und keinesfalls den Versuchsleiter direkt anblicken. Am Beispiel der Kreisverkehrsdurchfahrt (S06) wird die situationsabhängige Datenaufzeichnung veranschaulicht (vgl. Abbildung 3-35). Während der Sichtphase 1 bereitet der Versuchsleiter die Messung vor. Er überprüft die Datenverfügbarkeit und stellt eine gegebenenfalls stattfindende Kommunikation mit dem Probanden ein. Mit Beginn der Sichtphase 2 wird die Messung gestartet. Dazu wählt der Versuchsleiter die entsprechende Sichtsituation, in diesem Fall S06 aus. Während den weiteren Sichtphasen findet die Aufzeichnung der Messwerte statt. Mit dem Ende der Sichtphase 6 wird die Datenaufzeichnung durch eine weitere Eingabe des Versuchsleiters abgeschlossen. Messbeginn und Messende werden bei allen Sichtsituationen bei gestrecktem Glieder- oder Sattelzug ( $KW = 0^\circ$ ) durchgeführt.

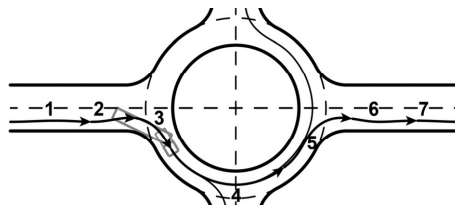


Abbildung 3-43: Situationsabhängige Datenaufzeichnung am Beispiel der Kreisverkehrsdurchfahrt (Bothe et al. 2013b S. 298)

Bei gewissen Sichtsituationen findet die relevante Sichtinteraktion gegebenenfalls vor der Auslösung der Messung durch den Versuchsleiter statt. Insbesondere ist hier der Überholvorgang auf der Autobahn (S10) zu nennen. Bei diesem Manöver ist der Start der Fahrtrichtungsänderung nicht durch den Wegpunkt vorgegeben, sondern wird vom Fahrer abhängig von der Verkehrssituation selbst gewählt. Der Versuchsleiter kann die Messung erst auslösen nachdem der Fahrer zum Ausscheren ansetzt. Der zur Analyse der indirekten Sichtinteraktion interessante Anteil der Beobachtung des rückwertigen Verkehrs ist zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossen. Um auch in Sichtsituationen, wie dem Überholmanöver, alle relevanten Daten erfassen zu können wurde zur Aufzeichnung der Daten ein Datenlogger mit vorgeschaltetem Ringspeicher ausgewählt. Der Ringspeicher zeichnet kontinuierlich Daten auf und setzt beim Start der Messung diese Daten mit der in Abbildung 3-44 angegebenen Vorlaufzeit vor den eigentlichen Messschrieb.

Stadt- & Rangier-Sichtsituationen	S01  $\Delta t = -5 \text{ s}$	S02  $\Delta t = -5 \text{ s}$	S03  $\Delta t = -5 \text{ s}$	S04  $\Delta t = -5 \text{ s}$
Landstraßen-Sichtsituationen	S05  $\Delta t = -5 \text{ s}$	S06  $\Delta t = -5 \text{ s}$	S07  $\Delta t = -5 \text{ s}$	S08  $\Delta t = -5 \text{ s}$
Autobahn-Sichtsituationen	S09  $\Delta t = -5 \text{ s}$	S10  $\Delta t = -20 \text{ s}$	S11  $\Delta t = -5 \text{ s}$	

Abbildung 3-44: Übersicht der Sichtsituationen und Vorlaufzeiten der Datenaufzeichnung (e. D. n. Isella 2012 S. 65)

---

## 4 Datenanalyse und ergonomische Auslegung

---

### 4.1 Datenaufbereitung

---

Um die im Probandenversuch aufgezeichneten Rohdaten für die Analyse nutzbar zu machen werden sie zunächst vorverarbeitet. Zur Beurteilung der Gewichtung einzelner Fahrstreckenanteile wird die situationsabhängige Zusammensetzung der Gesamtdatenbasis betrachtet. Nach einer Überprüfung der Sichtdatenverfügbarkeit werden die fahrer- und fahrzeugbezogenen dynamischen Messdaten aufbereitet und zusammen mit den statischen Daten in einer ergonomischen Sichtdatenbank abgelegt. Aus dieser Sichtdatenbank können über Filterfunktionen auswertungsorientierte Datensatzumfänge entnommen werden. Von den verfügbaren dynamischen Sichtdaten werden mittels eines parameterbasierten CAD-Modells die verwendeten Sichtbereiche der indirekten Sicht abgeleitet. So können innerhalb der Analyse neben den Augpunktlagenverteilungen auch die dynamischen Sichtbereiche fahrzeugparameterabhängig ausgewertet werden.

---

#### 4.1.1 Aufzeichnungsanteile und Sichtdatenverfügbarkeit

---

In Abbildung 4-1 ist die Verteilung der Fahrstrecken und der Sichtsituationen innerhalb der Gesamtdatenbasis dargestellt. Von den 1,9 Millionen Datensätzen wurden 16,5% während Stadt- und Rangier-Sichtsituationen, 23,3% während Landstraßen-Sichtsituationen und 60,2% während Autobahn-Sichtsituationen aufgezeichnet. Dabei haben die Kolonnen- und Baustellenfahrt auf der Autobahn gefolgt von der Überlandfahrt die größten Zeitanteile. Damit wird die fernverkehrstypische Gewichtung der Fahrstrecke (vgl. Kapitel 3.1.4) durch die Aufzeichnungsanteile wiedergegeben. Die einzelnen Durchläufe V1 bis V3 unterscheiden sich im Merkmal der Fahrstreckenzusammensetzung nicht voneinander. Die dynamischen Daten wurden mit einer Abtastfrequenz von 10 Hz ausgewertet. Damit repräsentiert die Gesamtdatenbasis eine Aufzeichnungsdauer der spezifizierten dynamischen Sichtsituationen von über 53 Stunden.

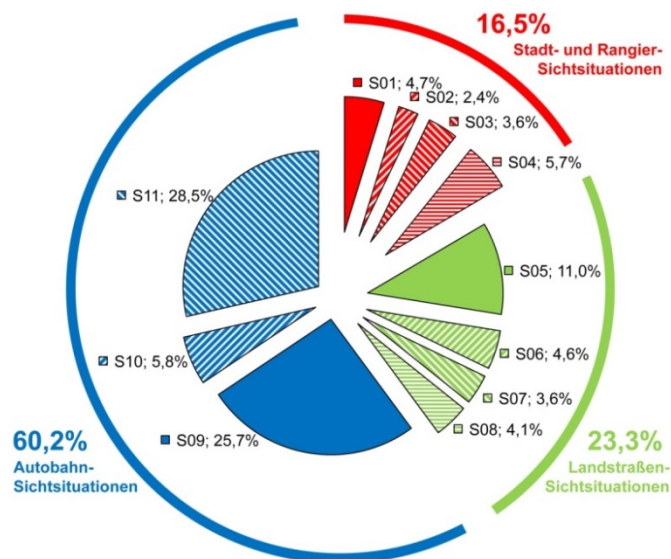


Abbildung 4-1: Aufzeichnungsanteil je Sichtsituation (V1-V3; S01-11; n = 1.916.041)

Bei der Auswertung von dynamischen Augpunktlagen und Sichtstrahlorientierungen ist die Beurteilung der Datenverfügbarkeit ein wichtiger Schritt der Datenaufbereitung. Die Datenverfügbarkeit beschreibt den prozentualen Anteil der auswertbaren Daten in Bezug auf die Gesamtanzahl der aufgezeichneten Daten. Bei der Erhebung von Sichtdaten im realen Straßenverkehr kommt es aufgrund von temporären Verdeckungen der optischen Systeme, starkem Lichteintrag oder starken Erschütterungen zur Reduktion der Datenqualität. Ist das Level der Datenqualität zu niedrig liefert das Messsystem keine exakten Daten mehr. Bei dem in diesem Versuch verwendeten fahrzeugfesten System zur Sichtdatenerfassung führt auch ein Verlassen des Aufzeichnungsvolumens durch den Probanden oder eine extreme Kopfdrehung zur Reduktion der Datenverfügbarkeit.

Der Einfluss der Datenverfügbarkeit auf die Validität der Analyseergebnisse ist in der Fachwelt bekannt, es wurde jedoch noch keine einheitliche Definition der unteren tolerierbaren Schwelle der Datenverfügbarkeit definiert (vgl. ISO 15007-1 2002; ISO/DIS 15007-1 2013; ISO 15007-2 2001). In dieser Arbeit wurde die untere Datenverfügbarkeitsschwelle auf 50% festgelegt. Bei diesem Wert können nur die Hälfte der aufgezeichneten Sichtdaten ausgewertet werden und die Analyse von Daten mit geringerer Verfügbarkeit führt zu fragwürdigen Ergebnissen.

Die mittlere Sichtdatenverfügbarkeit über alle Probanden je Sichtsituation und Versuchsfahrzeug ist in Abbildung 4-2 dargestellt. Bei komplexen Sichtsituationen wie der Kreisverkehrsdurchfahrt (S06) ist die Datenverfügbarkeit geringer als bei Baseline-Szenarien wie der Geradeausfahrt (S05). Über alle aufgezeichneten Datensätze (gesamt) liegt die Verfügbarkeit von dynamischen Sichtdaten je Fahrzeug zwischen 70% und 80%. Bei den beiden Rangier-Sichtsituationen S03 und S04 fällt der Wert der Datenverfügbarkeit für einzelne Fahrzeuge unter die kritische Marke von 50%. Aus diesem Grund wurden für die weitere Auswertung die Sichtsituationen S03 und S04 nicht berücksichtigt.

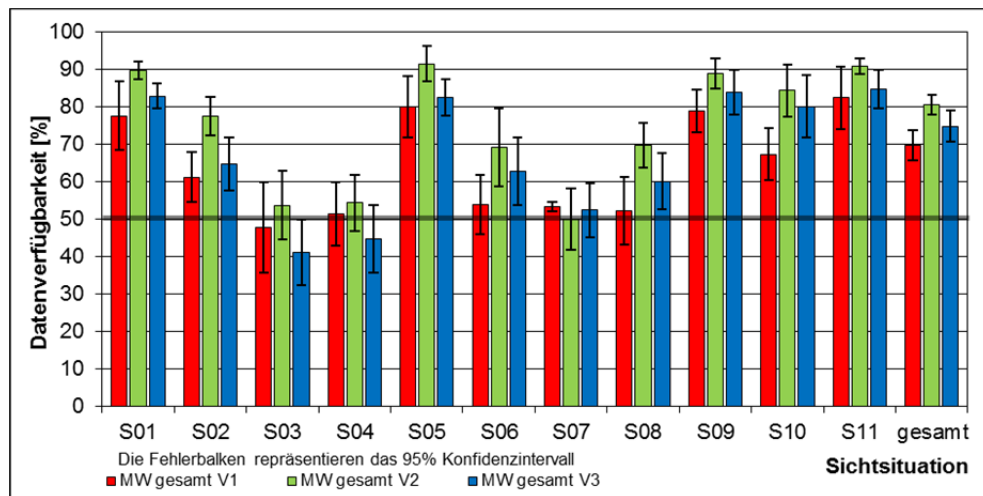


Abbildung 4-2: Sichtdatenverfügbarkeit je Sichtsituation und Versuchsfahrzeug

Der Auswertungsumfang der Gesamtdatenbasis wird nach der Beurteilung der Sichtdatenverfügbarkeit reduziert. Damit verändert sich auch die prozentuale Gewichtung der Einzelkomponenten der Fahrstreckenzusammensetzung im ausgewerteten Datenumfang (vgl. Abbildung 4-3). Die 1,7 Millionen ausgewerteten Daten setzten sich zu 66,3% aus Autobahn-Situationen, zu 25,8% aus Landstraßen-Szenarien und zu 7,9% aus Stadt-Sichtsituationen zusammen. Damit wird die typische Fahrstreckenzusammensetzung eines Fernverkehrsfahrzeugs (vgl. Kapitel 3.1.4), mit Ausnahme der nicht ausgewerteten Rangier-Situationen, sehr gut repräsentiert.

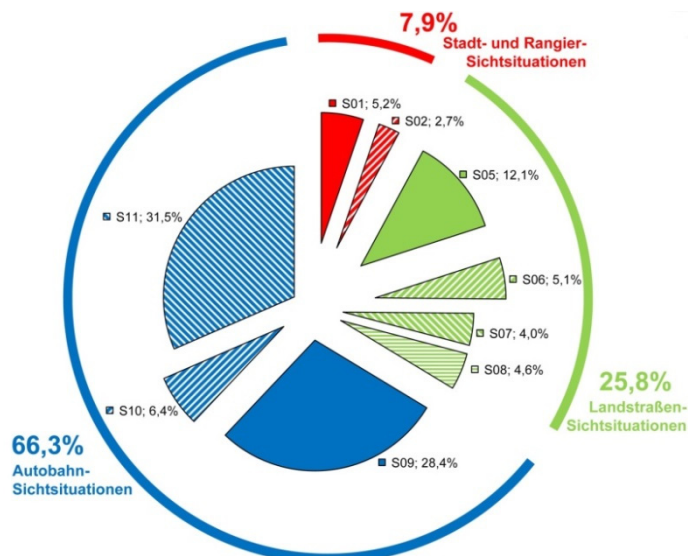


Abbildung 4-3: Auswertungsanteil je Sichtsituation (V1-V3; S01-02 & S05-11; n = 1.736.293)



#### 4.1.2 Aufbereitung der fahrerbezogenen dynamischen Messwerte

Sichtdaten deren Kennwerte der Qualität der Kopfpositionsdetektion (HPC) oder des Augenöffnungsgrades (ECL, ECR) (vgl. Kapitel 3.2.2) unterhalb von 50% lagen wurden innerhalb dieser Arbeit nicht ausgewertet. Da die gerichtete visuelle Informationsaufnahme nur während der Fixation eines Sichtziels stattfindet (vgl. Kapitel 2.1.1; Hoffman 1998 S. 120), werden auch die Sichtdaten während sakkadischen Blicksprüngen für die weitere Analyse aussortiert. Zur Detektion der Sakkaden wird das von Duchowski (2007 S. 141 ff.) vorgeschlagene Filtermodell auf Basis der Blickwinkeländerungsgeschwindigkeit (gaze velocity) verwendet (vgl. Gatti 2013 S. 52). Die aufgezeichneten Augpunktlagen vor, während und nach einer Sichtzielveränderung mit einer Geschwindigkeit  $> 130^\circ/\text{s}$  werden in dieser Arbeit nicht verwendet. Damit ist sichergestellt, dass nur Datensätze während der Fixationen eines Sichtzieles (vgl. ISO 15007-1 2002 S. 4) ausgewertet werden.

Die Rohdaten beinhalten die Informationen über die Augpunktlage und die Sichtstrahlorientierung. Um die Sichtzielpunkte, die zur weiteren Analyse der Daten notwendig sind, zu erzeugen wurden die in Abbildung 4-4 dargestellten Sichtzielflächen (AOIs) definiert (vgl. ISO/DIS 15007-1 2013S. 8 ff.). Sie werden für jedes Versuchsfahrzeug konstruiert und beschreiben beispielsweise die dreidimensionale Kontur des linken (AOI 03) oder rechten Hauptspiegels (AOI 05) im Kabinen-Koordinatensystem (KKOS). Durch den Schnitt des Sichtstrahlvektors mit der Sichtzielfläche wird der Sichtzielpunkt (GIP) erzeugt. Die Klassifizierung der Datensätze mithilfe der AOIs beinhaltet für die Spiegelsicht zwei Bedingungen. Um einen GIP auf der Spiegeloberfläche zu erzeugen muss der Sichtvektor ebenfalls die AOI der entsprechenden Seitenscheibe durchdringen. Damit ist sichergestellt, dass die Spiegeloberfläche durch die Fensteröffnung gesehen und nicht durch eine Sichteinschränkung wie den oberen Fenstereinzug behindert wird.

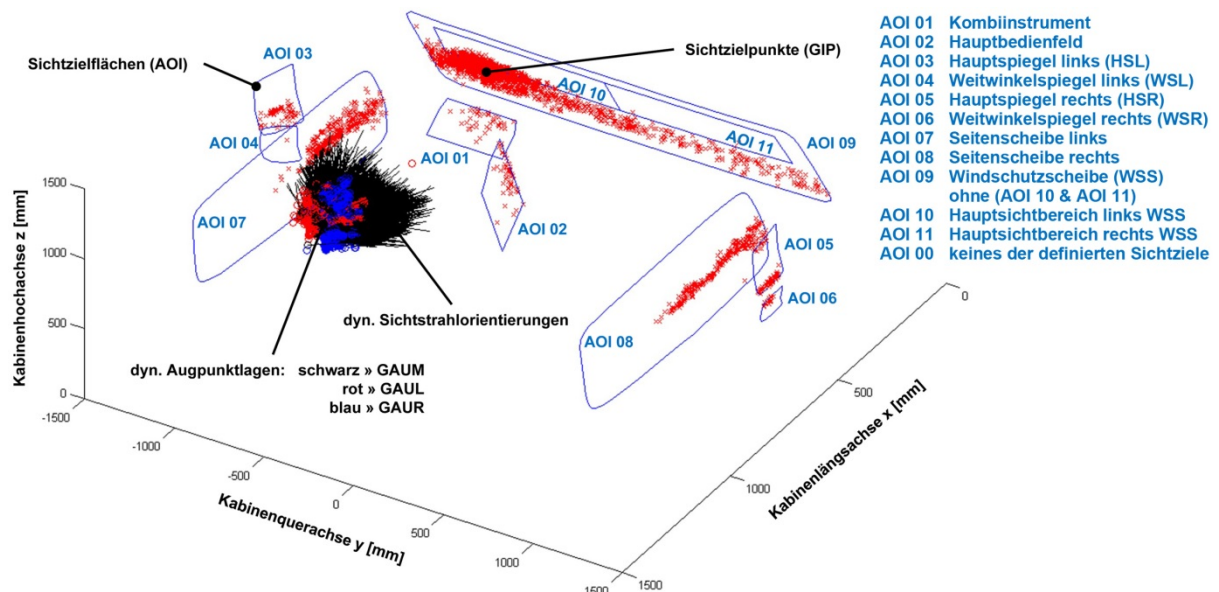


Abbildung 4-4: Definition der Sichtzielflächen (AOI) und Berechnung der Sichtzielpunkte (GIP) (e. D. nach Gatti 2013 S. 52)

Die in Abbildung 4-4 dargestellten dynamischen Augpunktlagen, Sichtstrahlorientierungen und Sichtzielpunkte repräsentieren eine beispielhafte Verteilung für einen Aufzeichnungsabschnitt einer Versuchsperson. Insgesamt liegen über 1,7 Millionen auswertbare Sichtdatensätze von 152 Versuchspersonen in 3 Fernverkehrsfahrzeugen vor. Jeder Sichtdatensatz beinhaltet die Augpunktlagenkoordinaten des aufgezeichneten linken (GAUL) und rechten Auges (GAUR), sowie des berechneten Mittelauges (GAUM). Für jede dieser drei Augpunktlagen ist der individuelle Sichtstrahlvektor und der entsprechend klassifizierte Sichtstrahlpunkt (GIP) dokumentiert. Aus Gründen des ausreichenden Informationsgehalts, der Darstellbarkeit und des Berechnungsaufwands werden im Folgenden die Mittelaugpunkte (GAUMs) bevorzugt herangezogen. Der GAUM wird ebenfalls in den grundlegenden Arbeiten zur Beschreibung von Sichtdaten verwendet (vgl. Kapitel 2.3). Zur Auswertung der binokularen Sicht im Nahfeld, wie der Verdeckungen von Anzeigeelementen durch den Lenkradschatten, können die Sichtdaten des GAUL und GAUR herangezogen werden.

#### 4.1.3 Aufbereitung der fahrzeugbezogenen dynamischen Messwerte

In Kapitel 1.1.4, Kapitel 2.1.3 und Kapitel 2.3.3 wurde die Abhängigkeit der vom Fahrer genutzten Sichtbereiche vom Knickwinkel (KW) zwischen Zugmaschine und Auflieger eines Nutzfahrzeugs beschrieben (vgl. Bothe et al. 2013b S. 298 ff.; Zaindl et al. 2013 S. 3 ff.; ISO/FDIS 16505 2014 S. 93 ff.). Auf Basis der erhobenen fahrzeugbezogenen dynamischen Messwerte wird der Knickwinkel der Fahrzeugkombination für jeden Messzeitpunkt mit dem in Abbildung 4-5 dargestellten Berechnungsmodell ermittelt. Der sog. Knickwinkelschätzer wurde von Bothe et al. (2013e S. 9) vorgestellt und durch die Arbeiten von Nitze (2011 S. 51 ff.), Ripper (2012 S. 75 ff.) und Ochs (2012 S. 42 ff.) validiert. Der Knickwinkelschätzer wird ebenfalls in aktuellen Entwicklungsprojekten zur Querdynamikregelung im Nutzfahrzeugumfeld eingesetzt (vgl. Huber et al. 2014 S. 13 f.).

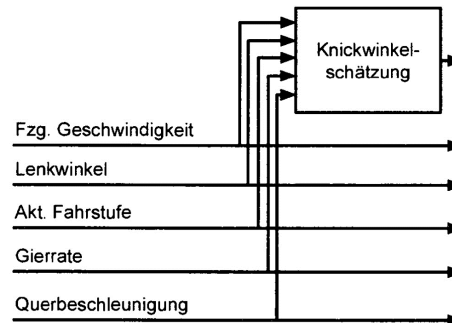


Abbildung 4-5: Funktionsprinzip des Knickwinkelschätzers (Bothe et al. 2013e S. 9)

Als Eingangsgrößen des Knickwinkelschätzers werden die Fahrzeuggeschwindigkeit, der Lenkwinkel, die Fahrstufe, die Gierrate und die Querbeschleunigung verwendet. Die konzeptbedingten Abmessungen der Nutzfahrzeugkombination und die Parameter der Fahrdynamik sind versuchsfahrzeugspezifisch im Modell hinterlegt. Der Berechnungsalgorithmus wird als „Schätzer“ bezeichnet, da zur Erzielung exakter Berechnungsergebnisse eine gestreckte Zugkombination ( $KW = 0^\circ$ ) zum Beginn der Datenaufzeichnung vorausgesetzt wird. Wird die Aufzeichnung bei abgeknicktem Anhänger gestartet, kann der Knickwinkelschätzer erst nach einer knickwinkelabhängigen Fahrtstrecke die exakten Werte liefern. Aus diesem Grund wurde bei der Sichtsituationsdefinition und der Datenerhebung auf eine gestreckte Zugausrichtung bei Messbeginn geachtet (vgl. Kapitel 3.1.4 & Kapitel 3.5.2).

Ein exemplarischer Verlauf der Fahrzeuggeschwindigkeit, des Lenkradwinkels und des berechneten Knickwinkels bei einer Kreisverkehrsdurchfahrt (S06) ist in Abbildung 4-6 aufgetragen. Die Geschwindigkeit wird typischerweise bei der Ein- und Ausfahrt verringert und ist während der Durchfahrt annähernd konstant. Der Knickwinkel der Fahrzeugkombination baut sich abhängig vom Lenkradwinkel über die Fahrtstrecke auf. Bei der Ein- und Ausfahrt sind negative Knickwinkelwerte (Rechtskurven), bei der Durchfahrt positive Knickwinkelwerte (Linkskurve) zu beobachten. Zum Beginn und zum Ende der Aufzeichnung ist die Zugkombination gestreckt ( $KW = 0^\circ$ ).

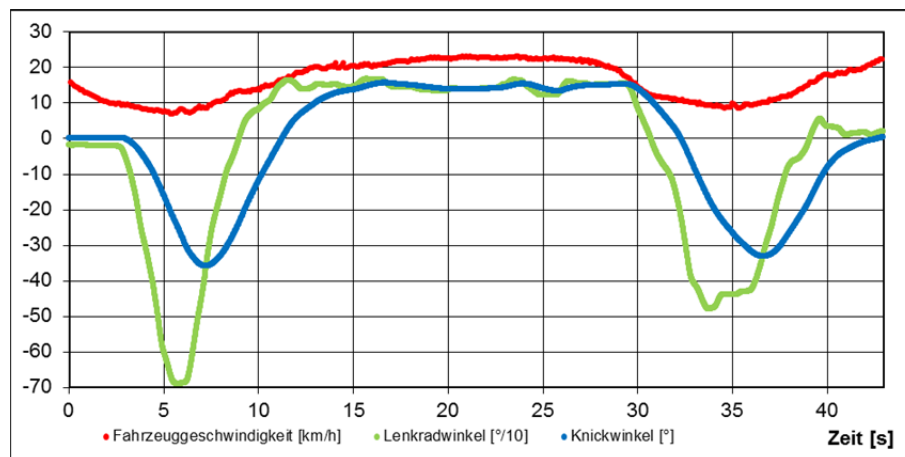


Abbildung 4-6: Exemplarischer Knickwinkelverlauf für eine Kreisverkehrsdurchfahrt (S06)

#### 4.1.4 Ergonomische Sichtdatenbank

Die aufgezeichneten und aufbereiteten Messwerte werden in einer ergonomischen Sichtdatenbank zusammengefasst. Dazu wird für jeden der über 1,9 Millionen Messzeitpunkte ein verknüpfter Datensatz erzeugt. Dieser beinhaltet die fahrer- und fahrzeugbezogenen statischen und dynamischen Messwerte (vgl. Tabelle 4-1). Somit ist der dynamischen Augpunktlage unter Anderem das Sichtziel, in das während der Aufzeichnung geblickt wurde, zugewiesen. Desweiteren ist z. B. dokumentiert mit welcher Geschwindigkeit und welchem Knickwinkel in welcher Sichtsituation und mit welchem Fahrzeug während dieses eindeutigen Messzeitpunktes gefahren wurde. Insgesamt sind jeder Augpunktlage (GAUM) innerhalb eines Datensatzes 72 mehrdimensionale Zusatzinformationen zugewiesen. Durch den Suchschlüssel (SSL), der aus den Werten des Versuchsfahrzeuges (V), der Versuchsperson (VP) und des individuellen Messzeitpunktes (TimeSlot) aufgebaut ist, kann jeder Datensatz eindeutig identifiziert und selektiert werden.

Tabelle 4-1: Elemente eines Datensatzes der ergonomischen Sichtdatenbank

Kurzzeichen	Bezeichnung	Einheit	Kurzzeichen	Bezeichnung	Einheit
<b>NAT</b>	Nationalität	-	<b>SSL</b>	Suchschlüssel d. Datenbank	[V,VP,TS]
<b>G</b>	Geschlecht	[M/W]	<b>V</b>	Versuchsfahrzeug	-
<b>BJ</b>	Bezugsjahr	[Jahr]	<b>VP</b>	Versuchsperson	-
<b>PO</b>	Population	-	<b>S</b>	Sichtsituation	-
<b>A</b>	Lebensalter	[Jahre]	<b>TimeSlot</b>	Messzeitpunkt im Versuch	[10 ms]
<b>SH</b>	Nutzung Sehhilfe	[ja/nein]	<b>GAUL</b>	Augpunktlage links 3D	3 <sup>x</sup> [mm]
<b>FL</b>	Lkw-Fahrleistung	[km/Jahr]	<b>GAUR</b>	Augpunktlage rechts 3D	3 <sup>x</sup> [mm]
<b>ST</b>	Stadtanteil der FL	[%]	<b>GAUM</b>	Mittelaugpunktlage 3D	3 <sup>x</sup> [mm]
<b>LA</b>	Landstraßenanteil der FL	[%]	<b>SOL</b>	Sichtstrahlorientierung GAUL	3 <sup>x</sup> [°]
<b>AB</b>	Autobahnanteil der FL	[%]	<b>SOR</b>	Sichtstrahlorientierung GAUR	3 <sup>x</sup> [°]
<b>FE</b>	Lkw-Fahrerfahrung	[Jahre]	<b>SOM</b>	Sichtstrahlorientierung GAUM	3 <sup>x</sup> [°]
<b>KP01</b>	Kopfspitzpunkt	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>GVL</b>	Blickwinkeländerungsg. GAUL	[°/s]
<b>KP02</b>	Mittelaugpunkt	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>GVR</b>	Blickwinkeländerungsg. GAUR	[°/s]
<b>KP03</b>	Nackenzpunkt	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>GVM</b>	Blickwinkeländerungsg. GAUM	[°/s]
<b>KP04</b>	Schulterpunkt	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>GIPL</b>	Sichtzielpunkt GAUL 3D	3 <sup>x</sup> [mm]
<b>KP05</b>	Ellenbogenpunkt	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>GIPR</b>	Sichtzielpunkt GAUR 3D	3 <sup>x</sup> [mm]
<b>KP06</b>	Handgelenkpunkt	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>GIPM</b>	Sichtzielpunkt GAUM 3D	3 <sup>x</sup> [mm]
<b>KP07</b>	Mittelhandpunkt	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>AOI</b>	Sichtzielklassifizierung	-
<b>KP08</b>	Halspunkt	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>KPOS</b>	Kopfposition 3D	3 <sup>x</sup> [mm]
<b>KP09</b>	Bauchpunkt	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>KO</b>	Kopforientierung 3D	3 <sup>x</sup> [°]
<b>KP10</b>	Kniepunkt	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>HI</b>	HeadIn	-
<b>KP11</b>	Hüftpunkt	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>HPC</b>	Head Position Confidence	-
<b>FP01</b>	Spiegelpunkt HSL oben	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>ECL</b>	EyeClosureLeft	-
<b>FP02</b>	Spiegelpunkt HSL mitte	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>ECR</b>	EyeClosureRight	-
<b>FP03</b>	Spiegelpunkt HSL unten	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>Speed</b>	Fahrzeuggeschwindigkeit	[km/h]
<b>FP04</b>	Spiegelpunkt WSL oben	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>LongAccel</b>	Längsbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
<b>FP05</b>	Spiegelpunkt WSL mitte	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>LatAccel</b>	Querbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
<b>FP06</b>	Spiegelpunkt WSL unten	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>Steerangl</b>	Lenkradwinkel	[°]
<b>FP07</b>	Spiegelpunkt HSR oben	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>SteerCount</b>	Lenkradumdrehungszähler	-
<b>FP08</b>	Spiegelpunkt HSR mitte	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>SteerAll</b>	Lenkradgesamtwinkel	[°]
<b>FP09</b>	Spiegelpunkt HSR unten	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>Wheelangl</b>	Radwinkel	[°]
<b>FP10</b>	Spiegelpunkt WSR oben	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>YawRate</b>	Giergeschwindigkeit	[°/s]
<b>FP11</b>	Spiegelpunkt WSR mitte	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>KW</b>	Knickwinkel	[°]
<b>FP12</b>	Spiegelpunkt WSR unten	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>LongGPS</b>	geographische Länge	[° ' "]
<b>FP13</b>	Lenkradmittelpunkt	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>LatGPS</b>	geographische Breite	[° ' "]
<b>FP14</b>	Sitzpunkt vorne	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>Date</b>	Datum des Versuchs	[date]
<b>FP15</b>	Sitzpunkt hinten	3 <sup>x</sup> [mm]	<b>Time</b>	Uhrzeit des Versuchs	[time]

Zur ergonomischen Auslegung innerhalb der Fahrzeugentwicklung (vgl. Kapitel 2.2.1) werden für definierte Absicherungsinhalte anwendungsorientierte Sichtdatensätze benötigt. So ist es z. B. wenig sinnvoll, wenn zur Absicherung der Positionierung einer Anzeige im Kombiinstrument alle Sichtdatensätze, oder die der Sicht in den rechten Außenspiegel, herangezogen werden. Die Möglichkeit zur differenzierten Auswahl der relevanten Sichtdaten ist durch das Funktionsprinzip der ergonomischen Sichtdatenbank gegeben (vgl. Abbildung 4-7). Da für jeden Suchschlüssel (SSL) alle 73 Einzelmesswerte vorliegen, können Datensätze, die die Parameter der individuellen Anfrage erfüllen, anwendungsorientiert herausgefiltert werden.

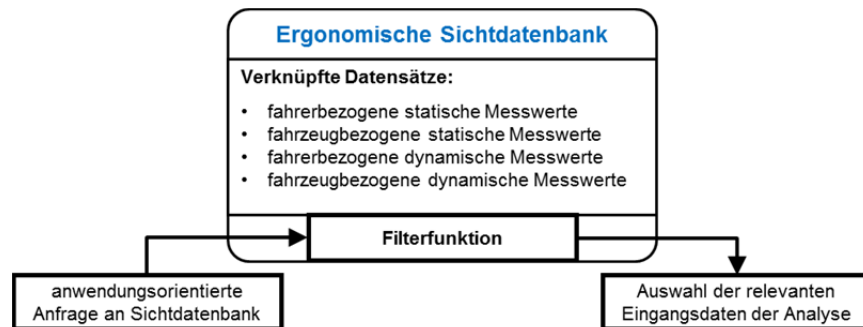


Abbildung 4-7: Funktionsprinzip der ergonomischen Sichtdatenbank (Bothe et al. 2013c S. 16)

Auch zur Analyse des Einflusses der Faktoren A bis D auf die dynamischen Augpunktlagen und Sichtbereiche werden die Filterfunktionen der ergonomischen Sichtdatenbank verwendet. So können die Datensätze der Vergleichsgruppen wie der kleinen oder großen Probanden aus der Gesamtdatenbasis herausgefiltert werden. Die gesamtheitliche Analyse aller 1,7 Millionen auswertbarer Sichtdatensätze ist empirisch weder sinnvoll, noch kann sie aufgrund der großen Datenmenge durchgeführt werden. Zur Untersuchung von sichtrelevanten Zusammenhängen werden daher immer auswertungsorientierte Teilmengen der Gesamtdatenbasis herangezogen.

#### 4.1.5 Modell zur Sichtbereichsberechnung

Die vom Fahrer innerhalb dynamischer Sichtsituationen genutzten Bereiche der indirekten Sicht können nicht direkt aus den in der ergonomischen Sichtdatenbank abgelegten Datensätzen abgeleitet werden. Sie werden mit einem CAD-basierten Modell zur Sichtbereichsberechnung konstruktiv ermittelt. Um aus den aufgezeichneten Sichtdaten die Sichtzielbereiche der indirekten Sicht zu berechnen, wird die optische Kopplung zwischen Augpunktlage, Spiegeloberfläche und Sichtziel (vgl. Kapitel 1.1.4 und Kapitel 2.2.1) computerbasiert simuliert. In Abbildung 4-8 sind die kabinenfesten Konstruktionskomponenten des Modells zur Sichtbereichsberechnung dargestellt.

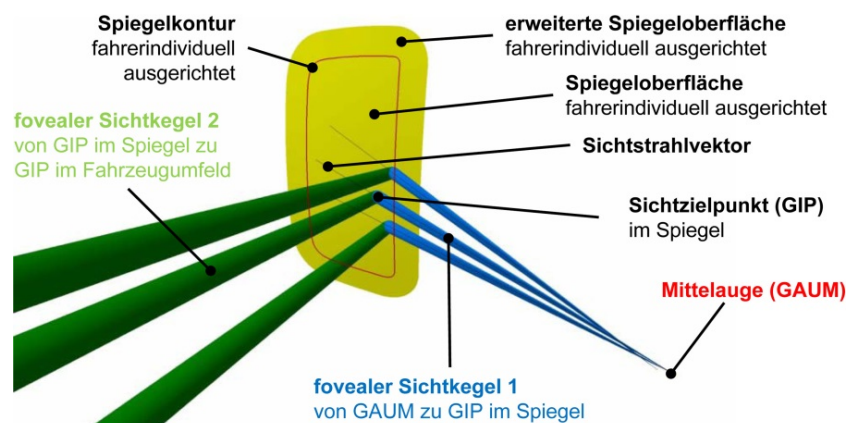


Abbildung 4-8: Kabinenfixe Komponenten des CAD-Grundmodells zur Sichtbereichsberechnung (Bothe et al. 2012a S. 1650)

Das CAD-Modell zur Bestimmung der dynamischen Sichtbereiche ist parameterbasiert aufgebaut (vgl. Bothe et al. 2012a S. 1650; Hebe 2012 S. 26 ff.; Kläser 2013 S. 62 ff.). In der Umsetzung bedeutet das, dass ein einheitliches Grundmodell durch die Eingabe von Parameterwertsätzen individuell



angepasst wird. Die Endpunkte der fovealen Sichtkegel 1, die den fixierten Sichtbereich mit einem Kegelöffnungswinkel von  $2^\circ$  repräsentieren (vgl. Kapitel 2.1.2; Schweigert 2002 S. 5), werden durch die individuellen Augpunkt- (GAUM) und Sichtzielpunktkoordinaten (GIP) parametrisiert. Die Spiegeloberfläche wird im Fall der Simulation der Sicht über den linken Hauptspiegel (HSL) nach den drei fahrerindividuellen Messpunkten (FP01 bis FP03) ausgerichtet. Die Spiegelkontur begrenzt die Spiegeloberfläche und definiert den durch die periphere Sicht maximal nutzbaren Bereich der Spiegelsicht. Um auch Fixationen im Randbereich der Spiegeloberfläche berücksichtigen zu können, wurde die Reflektionsfläche des Spiegels krümmungsstetig erweitert. Der foveale Sichtkegel 1 wird an der erweiterten Spiegeloberfläche reflektiert. Dadurch wird der foveale Sichtkegel 2, der aufgrund der Spiegelkrümmung aufgeweitet ist, erzeugt. In Abbildung 4-9 sind die weiteren Komponenten der Simulationsumgebung wiedergegeben. Dabei handelt es sich um das Zugfahrzeug, den Auflieger und die Fahrbahnoberfläche. Zur Beurteilung der Sichtumgebung sind ebenfalls die zulassungsrelevanten Sichtfelder (ECE-R 46/02 2009 Abs. 15.2.4.2) und zwei Referenzfahrzeuge dargestellt.

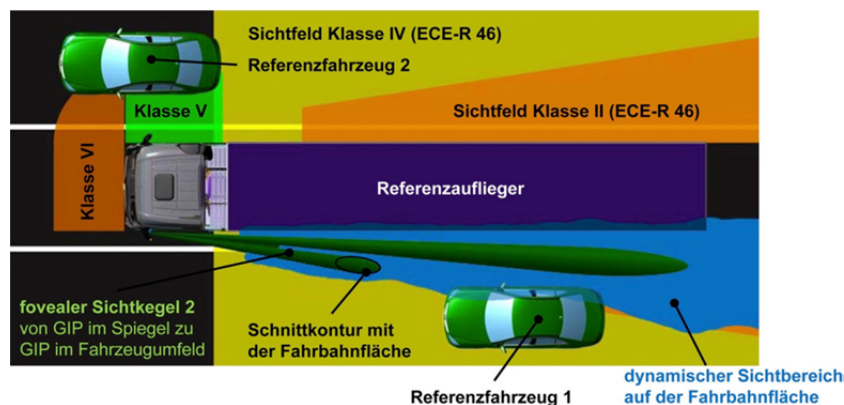


Abbildung 4-9: Simulationsumgebung des CAD-Grundmodells zur Sichtbereichsberechnung (Bothe et al. 2012a S. 1650)

Der foveale Sichtkegel 2 wird mit der Fahrbahnoberfläche geschnitten und es entsteht die Schnittkontur, die das Sichtziel des Fahrers für diesen Messzeitpunkt repräsentiert. Durch die Überlagerung aller Sichtzielkonturen für einen Auswertungszeitraum entsteht der dynamische Sichtbereich auf der Fahrbahnoberfläche. Er berücksichtigt alle Fixationen und kann mit den gesetzlichen Sichtfeldern, dem Referenzaufleger und den Referenzfahrzeugen in Bezug gesetzt werden.

Um die großen Datenmengen, die innerhalb des Probandenversuchs aufgezeichnet wurden, verarbeiten zu können, werden mehrere Instanzen des beschriebenen CAD-Modells mit Hilfe eines Makros angesteuert. Die Parameter der auswertungsorientierten Auswahl der Sichtdatensätze werden in Konstruktionstabellen abgelegt und automatisiert abgearbeitet (vgl. Kläser 2013 S. 69). In Abbildung 4-10 sind die exemplarischen Umrissdarstellungen eines Makrodurchlaufs zur Beurteilung der Sichtbedarfe im Knickwinkelbereich zwischen  $12,5^\circ$  und  $27,5^\circ$  dargestellt. Neben den bereits vorgestellten Konturen werden ebenfalls der periphere Sichtbereich, die Aufliegerposition und der Sichtschatenwurf der hinteren Aufliegerkante berechnet.

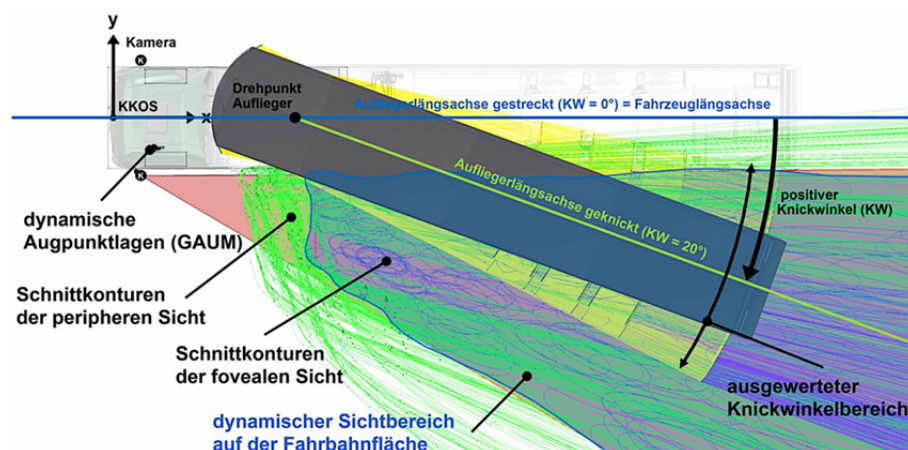


Abbildung 4-10: Makroasierte Anwendung des CAD-Modells zur Ableitung der dyn. Sichtbereiche

## 4.2 Analyse statischer und dynamischer Augpunktlagenverteilungen

In diesem Kapitel werden Augpunktlagen, die in drei unterschiedlichen Fahrzeugvarianten (V1-V3) aufgezeichnet wurden, zur Analyse herangezogen. Die Augpunktlagen werden jeweils im Kabinenkoordinatensystem (KKOS) angegeben. Da sich das Fahrzeug V3 von den beiden weiteren Fahrzeugvarianten in der Fahrerhausbreite und der damit verbundene Lage der Sitzmittelebene im KKOS unterscheidet, werden die y-Werte des Fahrzeugs V3 auf die Fahrzeuge V1 und V2 normiert. Dazu wird von allen Messwerten des V3 ein y-Offsetwert von 80 mm subtrahiert. Die Sitzmittelebenen aller ausgewerteten Fahrzeuge liegen damit aufeinander. Durch dieses Vorgehen wird eine Analyse der Messwerte zwischen den einzelnen Fahrzeugen und innerhalb der Gesamtstichprobe ermöglicht.

Zur Überprüfung der in Kapitel 2.4.1 aufgestellten Hypothesen werden zunächst die aufgezeichneten statischen und dynamischen Augpunktlagenverteilungen aller Versuchsfahrzeuge miteinander verglichen. Es folgt die Untersuchung des Einflusses der Körperhöhe (Faktor A) auf die dynamischen Augpunktlagen. Der Zusammenhang zwischen dem Taillenumfang (Faktor B) und der Verteilung der dynamischen fahrerindividuellen Sichtdaten wird ebenfalls betrachtet. Nach dem Vergleich der einzelnen Fahrzeugvarianten (Faktor C) wird letztendlich der Einfluss der auswertbaren Sichtsituationen (Faktor D) auf die Augpunktlagenverteilungen untersucht.

### 4.2.1 Vergleich statischer und dynamischer Augpunktlagen

Um die statischen und dynamischen Augpunktlagenverteilungen miteinander vergleichen zu können werden zunächst die probandenindividuellen Mittelwerte des jeweiligen Datenumfangs ermittelt. In Abbildung 4-11 wird das Vorgehen anhand der exemplarischen, in Versuchsfahrzeug 2 (V2) aufgezeichneten, Daten der Versuchsperson Nr. 58 (VP 58), deren Körperhöhe der Klassifizierung der mittleren Körperhöhengruppe entspricht (KH mittel), veranschaulicht. Durch die Seitenansicht sind die x- und z-Koordinaten innerhalb der gesamten Untersuchung standardisiert und konsistent im herangezogenen Kabinen-Koordinatensystem (vgl. Definition des KKOS im Glossar) abgebildet.

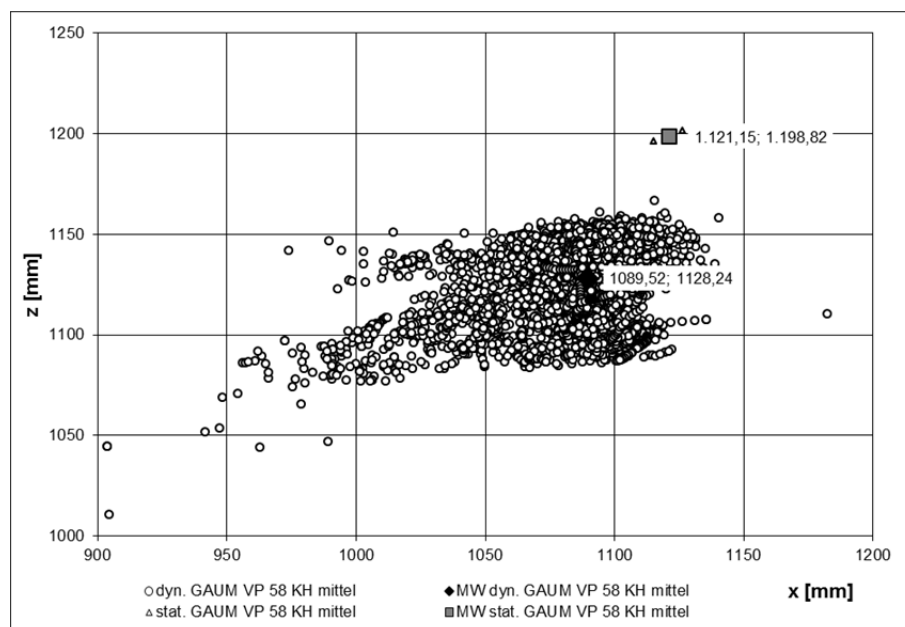


Abbildung 4-11: Ermittlung der probandenindividuellen Mittelwerte der statischen und dynamischen Augpunktlagenverteilungen (V2; VP58; n = 10.705) Seitenansicht

Es liegen zwei Datensätze (x-, y-, z-Koordinaten im KKOS) der statischen Augpunktlage (stat. GAUM VP) vor. Diese wurden nach der Standardmessmethode (vgl. Kapitel 2.3.1; Reed et al. 2000b S. 5 & 8) zu den beiden Messzeitpunkten (vgl. Kapitel 3.3.3) bei stehendem Fahrzeug ermittelt. Die mittlere probandenindividuelle statische Augpunktlage (MW stat. GAUM VP) wird durch die Bildung der Mittelwerte für jede Einzelkoordinate (x, y, z) der beiden Messpunkte erzeugt. Bei dieser

exemplarischen Versuchsperson liegen nach der Datenmessung und -aufbereitung  $n = 10.705$  Koordinatendatensätze (x-, y-, z-Koordinaten im KKOS) der dynamischen Augpunktlage (dyn. GAUM VP) vor. Sie wurden während der auswertbaren Sichtsituationen (S01, S02 & S05 bis S11) im vom Fahrer bewegten Fahrzeug aufgezeichnet. Innerhalb der gesamten Analyse werden nur Sichtdatensätze, bei denen in eines der relevanten Sichtziele (AOI 01 bis AOI 11) geblickt wurde, ausgewertet. Dadurch wird sichergestellt, dass nur Sichtdaten, die den einzelnen Auslegungskomponenten zugeordnet werden können, in die Ergebnisse einfließen. Die mittlere probandenindividuelle dynamische Augpunktlage (MW dyn. GAUM VP) wird durch die Bildung der Mittelwerte für jeder Einzelkoordinate (x, y, z) aller  $n = 10.705$  Messpunkte erzeugt. Die fahrstreckenabhängige Gewichtung der dynamischen Augpunktlagen wird durch die Sichtsituationsanteile innerhalb der betrachteten Sichtdatenauswahl (vgl. Kapitel 4.1.1) festgelegt.

In Abbildung 4-12 sind in der Draufsicht die x- und y-Koordinaten zur Ermittlung der probandenindividuellen Mittelwerte der statischen und dynamischen Augpunktlagenverteilungen aufgetragen. Neben den Mittelaugpunkten (GAUM) sind für die dynamische Verteilung auch die rechten (dyn. GAUR) und linken Augpunkte (dyn. GAUL) dargestellt. Bei der Messmethode zur Ermittlung statischer Augpunktlagen (stat. GAUM) werden diese Information nicht aufgenommen (vgl. Kapitel 3.2.1). Durch den Augabstand der dynamischen Augpunktlagen (dyn. GAUR & dyn. GAUL) ist in diesem Beispiel eine mittlere Kopfdrehung des Probanden in Fahrzeuginnenrichtung nach links zu erkennen. Da Kopfausrichtungs- und Sichtzielinformationen ebenfalls für den dynamischen Mittelaugpunkt (dyn. GAUM) vorliegen, ist der Mehrwert durch die Darstellung der Augenpaare begrenzt. In der ergonomischen Sichtdatenbank liegen zu jedem Datensatz die auswertbaren Parameterwerte des linken und rechten Auges vor. Aus Gründen der Darstellbarkeit und der hohen Anwendungsrelevanz in der Praxis (vgl. Kapitel 2.1 und Kapitel 2.3) werden innerhalb der folgenden Datenanalyse ausschließlich die Koordinatendatensätze des Mittelauges (GAUM) verwendet.

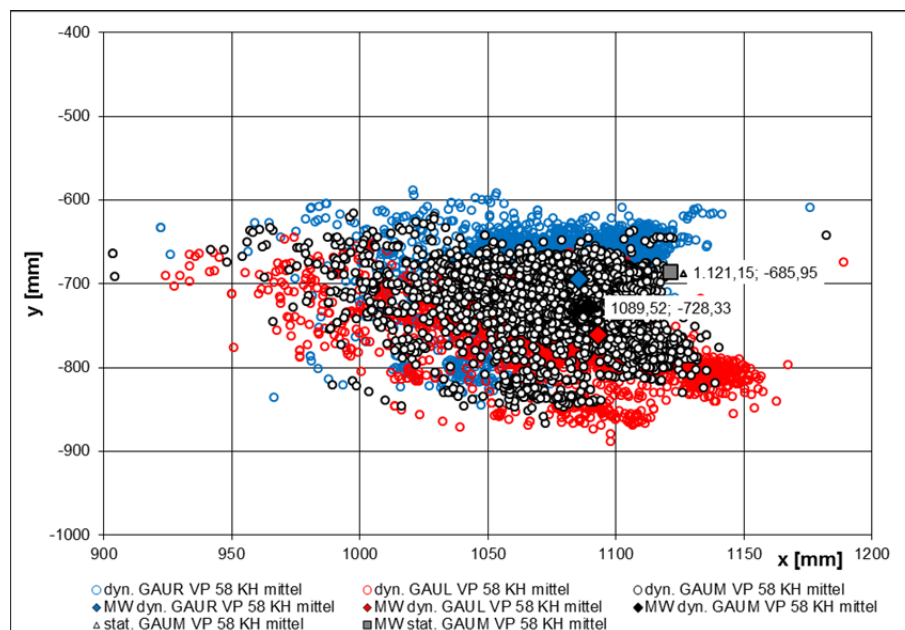


Abbildung 4-12: Ermittlung der probandenindividuellen Mittelwerte der statischen und dynamischen Augpunktlagenverteilungen (V2; VP58;  $n = 10.705$ ) Draufsicht

In den exemplarisch gezeigten Beispielen der Versuchsperson VP 58 unterscheiden sich der MW stat. GAUM und der MW dyn. GAUM in ihrer Position im Fahrzeug. Zur Analyse der Unterschiede zwischen dynamischen und statischen Augpunktlagenverteilungen aller VPs wurde die Hypothese 1 formuliert:

**Hypothese 1:** Die mittleren dynamischen Augpunktlagen unterscheiden sich von den mittleren statischen Augpunktlagen. (H1)

Um diese Unterschiedshypothese untersuchen zu können wurden die mittleren Augpunktlagen aller Probanden (MW GAUM gesamt) auf Grundlage der probandenindividuellen mittleren Augpunktlagen (MW GAUM Proband) berechnet und in Abbildung 4-13 f. dargestellt. Zur Visualisierung der Verteilung der statischen und dynamischen Mittelwerte sind ebenfalls die P90-Ellipsen eingezeichnet. Sie beinhalten 90% der jeweiligen Augpunktlagengruppe in zweidimensionaler Darstellung.

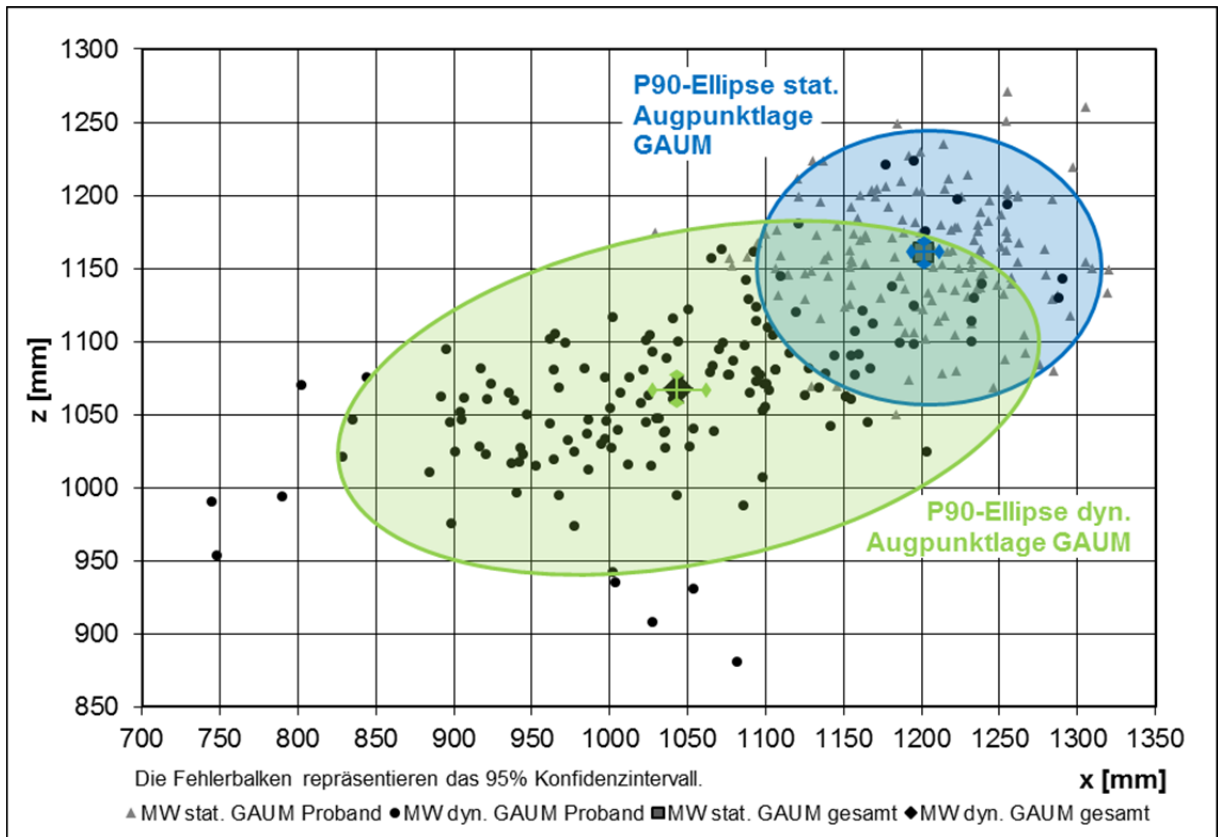


Abbildung 4-13: Vergleich Mittelwerte stat./dyn. Augpunktlagen (V1-V3; N = 152) Seitenansicht

Die x- und z-Koordinaten beider Testgruppen liegen normalverteilt vor. Die Daten wurden von denselben Probanden mit zwei unterschiedlichen Messverfahren ermittelt. Somit werden für die x- und y-Komponenten zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H1) t-Tests für verbundene Stichproben (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 414; Wilcox 1996 S. 240; Field 2013 S. 378) verwendet. Der Unterschied der mittleren statischen und der mittleren dynamischen Augpunktlage wird in x-Richtung ( $t(151) = 20,71$ ;  $p < 0,001$ ;  $d = 1,89$ ) und z-Richtung ( $t(151) = 22,29$ ;  $p < 0,001$ ;  $d = 1,87$ ) signifikant bestätigt. Die Mittelwertdifferenz (MWD) liegt für x bei 157,39 mm und für z bei 94,36 mm (vgl. Tabelle 4-2). Der Unterschied in diesen beiden Maßen muss aufgrund der hohen Effektstärken ( $d$ ) und großen Mittelwertdifferenzen (MWD) bei der ergonomischen Auslegung von sichtrelevanten Komponenten Berücksichtigung finden.

Tabelle 4-2: Ergebnisse der t-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H1)

Vergleich	Mittelwertdifferenz [mm]	Standardabweichung (gemittelt) [mm]	Signifikanz (zweiseitig)	Effektstärke (Cohen's $d$ )
MW stat. GAUM gesamt x – MW dyn. GAUM gesamt x	157,39	83,15	< 0,001	1,89
MW stat. GAUM gesamt z – MW dyn. GAUM gesamt z	94,36	50,27	< 0,001	1,87

Die Unterschiedshypothese H1 ist ungerichtet formuliert, daher wird die zweiseitige Signifikanz berichtet. Bei normalverteilten Stichproben werden zur Fehlerindikation im Diagramm die 95% Konfidenzintervalle, bei nicht normalverteilten Teilgruppen die Interquartilbereiche dargestellt.

In Abbildung 4-14 sind die x- und y-Koordinaten der Verteilungen aufgetragen. Die y-Werte der statischen Augpunktlagen liegen nicht normalverteilt vor. Daher wird für den Vergleich der Medianwerte in Fahrzeugquerrichtung der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für verbundene Stichproben (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 213; Siegel & Castellan 1988 S. 87; Bortz et al. 1990 S. 259; Field 2013 S. 228) herangezogen. Der Unterschied zwischen der mittleren statischen und der mittleren dynamischen Augpunktlage wird in y-Richtung ( $STS = 10,37$ ;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,59$ ) signifikant



bestätigt. Die Mediandifferenz (MDD) liegt bei 39,33 mm (vgl. Tabelle 4-3). Die Effektstärke (r), die auf Grundlage der standardisierten Test-Statistik (STS) berechnet wird, gibt einen mittleren Effekt an.

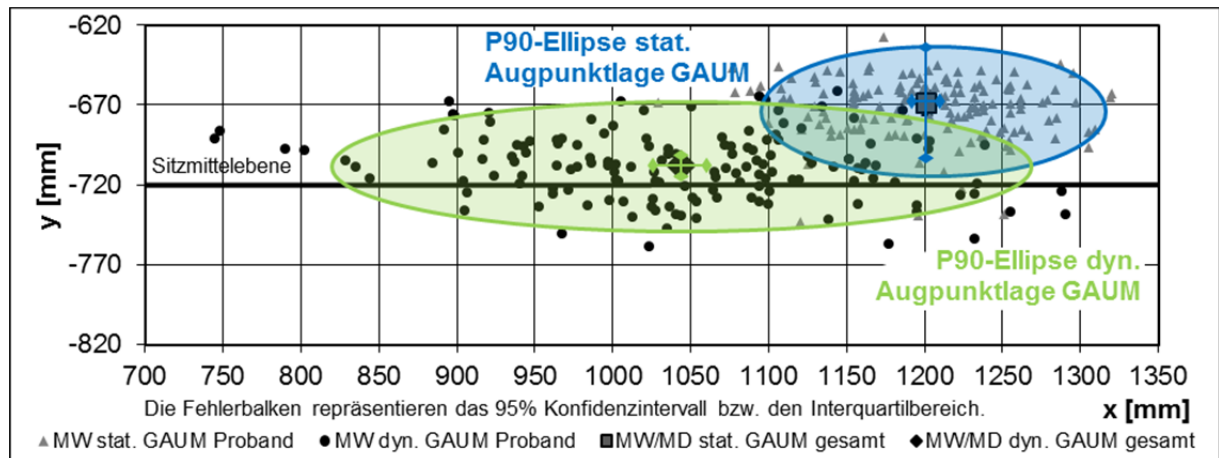


Abbildung 4-14: Vergleich Mittelwerte stat./dyn. Augpunktage (V1-V3; N = 152) Draufsicht

Tabelle 4-3: Ergebnisse des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H1)

Vergleich	Mediandifferenz [mm]	Interquartilbereich (gemittelt) [mm]	Signifikanz (zweiseitig)	Effektstärke (r)
MD stat. GAUM gesamt y – MD dyn. GAUM gesamt y	39,33	25,61	< 0,001	0,59

Der Medianwert (MD) der statischen Augpunktage (stat. GAUM gesamt) liegt bei  $y = -668,79$  mm und damit weiter entfernt von der Sitzmittelebene ( $y = -720$  mm) als der MD dyn. GAUM gesamt mit  $y = -708,12$  mm (vgl. Abbildung 4-14). Es kann durch diese Auswertung gezeigt werden, dass die Augpunktage der statischen Fahrhaltung in y-Richtung um mehr als 50 mm von der Sitzmittelebene abweichen. Während der Durchführung der dynamischen Fahraufgabe ist eine Tendenz der Sitzmittenzentrierung der Augpunktageverteilung zu erkennen. Dieser Effekt, der durch die dreidimensionale Messmethode des statischen (vgl. Kapitel 3.2.1) und des dynamischen Mittelaugpunktes (vgl. Kapitel 3.2.3) erst aufgezeigt werden kann, ist ebenfalls bei der ergonomischen Auslegung von sichtrelevanten Komponenten zu berücksichtigen.

Dynamische Augpunktage liegen im Vergleich zu statischen Augpunktage im Mittel weiter vorne, tiefer und mehr zur Sitzmittelebene hin orientiert. Die beschriebenen Unterschiede sind so erheblich, dass zur ergonomischen Auslegung von Fahrzeugen dynamische Augpunktageverteilungen und Sichtstrahlorientierungen herangezogen werden müssen. Insbesondere ist dies bei der Entwicklung und Absicherung von Sichtinteraktionssystemen wie dem Kamera-Monitor-System (KMS) der Fall.

Um auch die Verteilung der statischen und dynamischen Augpunktage anwendungsorientiert berücksichtigen zu können wird das Maß der Streubreite eingeführt. Die Methode zur Ermittlung der probandenindividuellen statischen und dynamischen Offsetwerte, die zur Beschreibung der Streubreite herangezogen werden, wird anhand der Abbildung 4-15 erläutert. Der definierte Offsetwert der dynamischen Augpunktage in Fahrzeuginnenraumrichtung (dyn. Offset MW dyn. GAUM gesamt x) beschreibt den Abstand in x-Richtung zwischen dem Mittelwert aller Probanden (MW dyn. GAUM gesamt) und dem probandenindividuellen Mittelwert (MW dyn. GAUM Proband). In y- und z-Richtung werden diese Offsetwerte nach derselben Methode ermittelt. Durch die Kombination aller drei Abstandswerte (x, y, z) wird der dreidimensionale Abstandswert (dyn. Offset MW dyn. GAUM gesamt 3D) erzeugt. Für die Verteilung statischer Augpunktage werden die Offsetwerte in selber Weise berechnet. Somit kann die Streuung der probandenindividuellen mittleren Augpunktage (MW GAUM Proband) der statischen und dynamischen Körperhaltung anhand der Komponenten-Offsetwerte (x, y, z) und des Gesamt-Abstandswerts (3D) verglichen werden. Die Offsetwerte nehmen nur positive Werte an und beinhalten daher keine Information über die Richtung der Abweichung von der Gesamt-Mittellage (MW GAUM gesamt).

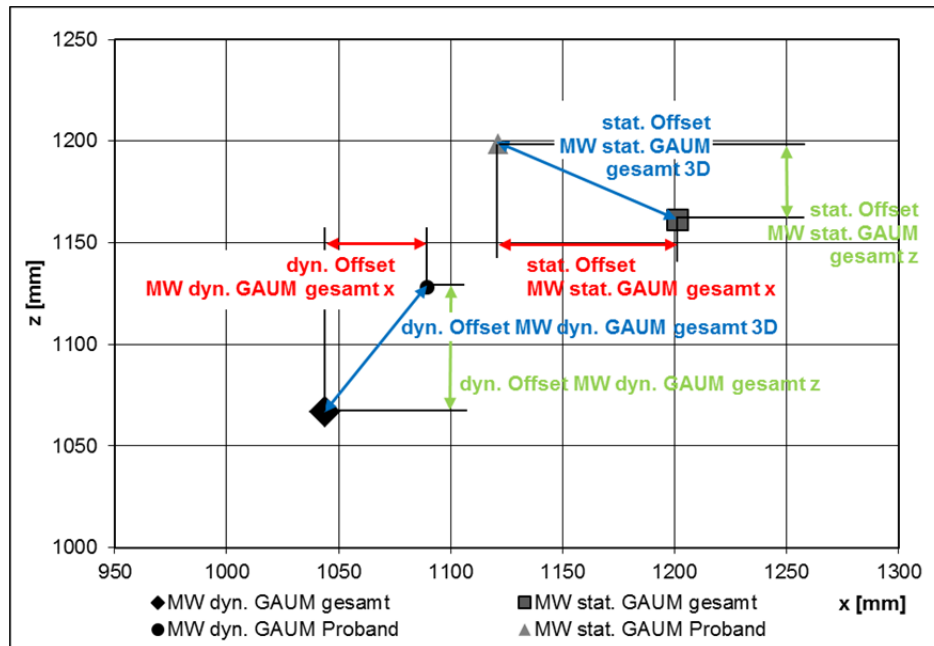


Abbildung 4-15: Ermittlung der probandenindividuellen statischen und dynamischen Offsetwerte zum MW GAUM gesamt zur Beschreibung der Streubreite

Nachdem die Streubreite der Augpunktlagenverteilungen über die definierten Offsetwerte beschrieben werden kann, wird die gerichtete Unterschiedshypothese (H2) bearbeitet. Diese wurde folgendermaßen formuliert:

**Hypothese 2:** Die Streubreite dynamischer Augpunktlagen ist größer als die Streubreite statischer Augpunktlagen. (H2)

Es sollen die mittleren Offsetwerte der statischen und dynamischen Augpunktlagenverteilungen miteinander verglichen werden. Nicht bei allen Komponenten (x, y, z, 3D) der Offsetwerte liegt eine Normalverteilung vor. Daher werden zum Vergleich der Streubreite die Medianwerte der Komponenten herangezogen. Es wird der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für verbundene Stichproben (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 213; Siegel & Castellan 1988 S. 87; Bortz et al. 1990 S. 259; Field 2013 S. 228) eingesetzt. Die Medianwerte und die Fehlerindikation über die Interquartilbereiche sind in Abbildung 4-16 visualisiert.

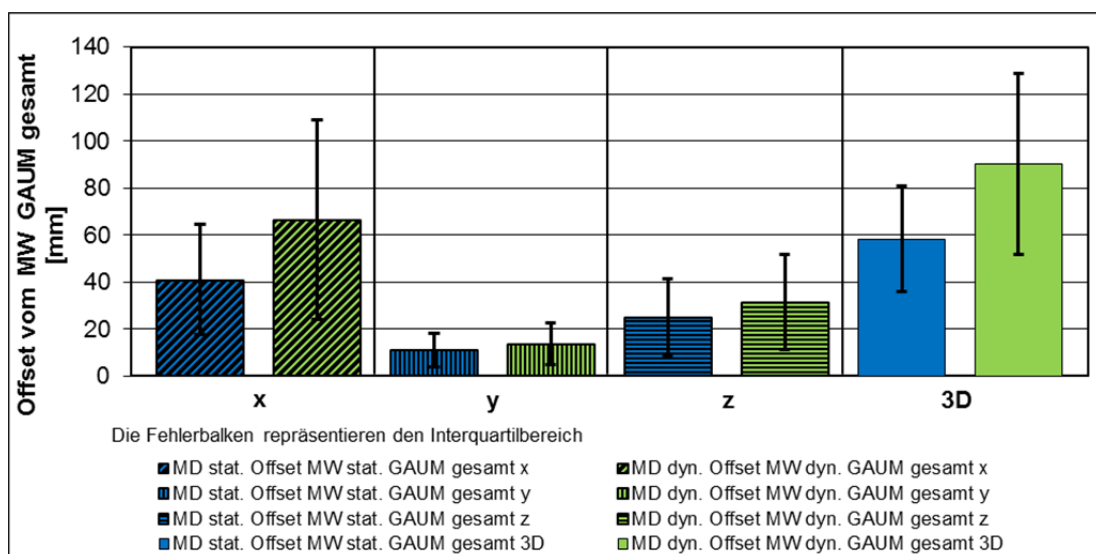


Abbildung 4-16: Streubreite statischer und dynamischer Augpunktlagen V1-V3 N = 152

Die Streubreiten der statischen (MD stat. Offset MW stat. GAUM gesamt x = 41,04 mm) und dynamischen Augpunktlagenverteilungen (MD dyn. Offset MW stat. GAUM gesamt x = 66,50 mm)

sind in x-Richtung am stärksten ausgeprägt. Sie leisten damit den größten Beitrag zu den Gesamtstreuweiten (3D) der Stichproben. Die Anteile in y- und z-Richtung sind gering.

Der Unterschied zwischen dem (MD stat. Offset MW stat. GAUM gesamt) und dem (MD dyn. Offset MW dyn. GAUM gesamt) wird in x-Richtung (STS = 9,75;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,56$ ), in y-Richtung (STS = 8,56;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,49$ ), in z-Richtung (STS = 9,15;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,52$ ) und dreidimensional (STS = 10,39;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,60$ ) signifikant bestätigt. Es kann in allen Fällen mindestens eine mittlere Effektstärke berichtet werden. Die Mediandifferenzen liegen jedoch nur in der x-Richtung mit 25,46 mm und der dreidimensionalen Betrachtung mit 32,04 mm in auslegungsrelevanten Größenordnungen (vgl. Tabelle 4-4).

Tabelle 4-4: Ergebnisse der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H2)

Vergleich	Mediandifferenz [mm]	Interquartilbereich (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (r)
MD stat. Offset MW stat. GAUM gesamt x – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM gesamt x	25,46	66,15	< 0,001	0,56
MD stat. Offset MW stat. GAUM gesamt y – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM gesamt y	2,66	16,10	< 0,001	0,49
MD stat. Offset MW stat. GAUM gesamt z – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM gesamt z	6,38	36,43	< 0,001	0,52
MD stat. Offset MW stat. GAUM gesamt 3D – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM gesamt 3D	32,04	60,97	< 0,001	0,60

Resümierend kann festgestellt werden, dass sich die mittleren dynamischen Augpunktlagen von den mittleren statischen Augpunktlagen unterscheiden. Hypothese 1 wird bestätigt. Dynamische Augpunktlagen liegen im Vergleich zu statischen Augpunktlagen im Mittel weiter vorne (MWD = 157,39 mm), tiefer (MWD = 94,36 mm) und mehr zur Sitzmittelebene hin orientiert (MDD = 39,33 mm). Die Streubreite dynamischer Augpunktlagen ist größer als die Streubreite statischer Augpunktlagen. Damit wird auch Hypothese 2 bestätigt. Für die ergonomische Auslegung sind insbesondere die Unterschiede der Streuung in x-Richtung (MDD = 25,46 mm) und der dreidimensionalen Offsetwert (MDD = 32,04 mm) zu berücksichtigen. Aufgrund der festgestellten Unterschiede zwischen statischen und dynamischen Augpunktlagenverteilungen wird die weitere Analyse ausschließlich mit Kennwerten der dynamischen Sichtinteraktion durchgeführt.

#### 4.2.2 Einfluss der Körperhöhe (Faktor A)

Der Einfluss der Körperhöhe auf die statische Körperhaltung wurde von Fröhmel (2010 S. 119) in Pkws und Cook et al. (2011 S. 36) in Lkws betrachtet. Aufgrund der konzeptionellen Randbedingungen innerhalb einer Lkw-Kabine erstreckt sich die Variation der statischen Augpunktlagen hauptsächlich in z-Richtung. Es soll untersucht werden, ob ein Einfluss der Körperhöhe (Faktor A) auf die dynamische Augpunktlagenverteilung in schweren Nutzfahrzeugen nachgewiesen werden kann. Daher wurde folgende Hypothese aufgestellt:

**Hypothese 3:** Die dynamischen Augpunktlagen kleiner Probanden liegen in Fahrzeughochrichtung tiefer als die dynamischen Augpunktlagen großer Probanden. (H3)

Die Auswahl der Faktorstufen ist in Kapitel 3.1.1 beschrieben. Die Gesamtstichprobe wird zur Analyse des Einflusses der Körperhöhe (KH) in drei Körperhöhengruppen (KHG) eingeteilt. Die kleinen  $n = 50$  Probanden ( $KH \leq 1738$  mm) bilden die untere Randgruppe (KHG klein). Die Gruppe der mittelgroßen Personen (KHG mittel;  $1738 \text{ mm} < KH \leq 1798$  mm) besteht aus  $n = 46$  Probanden. Die obere Randgruppe (KHG groß) beinhaltet  $n = 56$  großen Personen ( $KH > 1798$  mm). Die x- und z-Komponenten der probandenindividuellen Mittelwerte der dynamischen Augpunktlagen (MW dyn. GAUM Proband) und der Mittelwerte der jeweiligen Körperhöhengruppe sind in Abbildung 4-17 dargestellt. Die y-Komponente der Augpunktlagen ist in Anhang A7 visualisiert. Die Werte innerhalb aller Körperhöhengruppen sind normalverteilt. Zur Untersuchung der Hypothese 3 wird die z-Koordinate der dynamischen Augpunktlage kleiner (KHG klein) und großer Probanden (KHG groß) mittels eines t-Tests für unabhängige Stichproben (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 417; Wilcox 1996

S. 126; Field 2013 S. 371) verglichen. Die beiden Verteilungen unterscheiden sich in z-Richtung ( $t(50) = 2,92$ ;  $p = 0,002$ ;  $d = 0,57$ ) signifikant voneinander. Die Mittelwertdifferenz beträgt 29,46 mm und ist somit anwendungsrelevant und repräsentiert einen mittelstarken Effekt (vgl. Tabelle 4-5). Die gerichtete Unterschiedshypothese 3 wird durch den t-Test bestätigt.

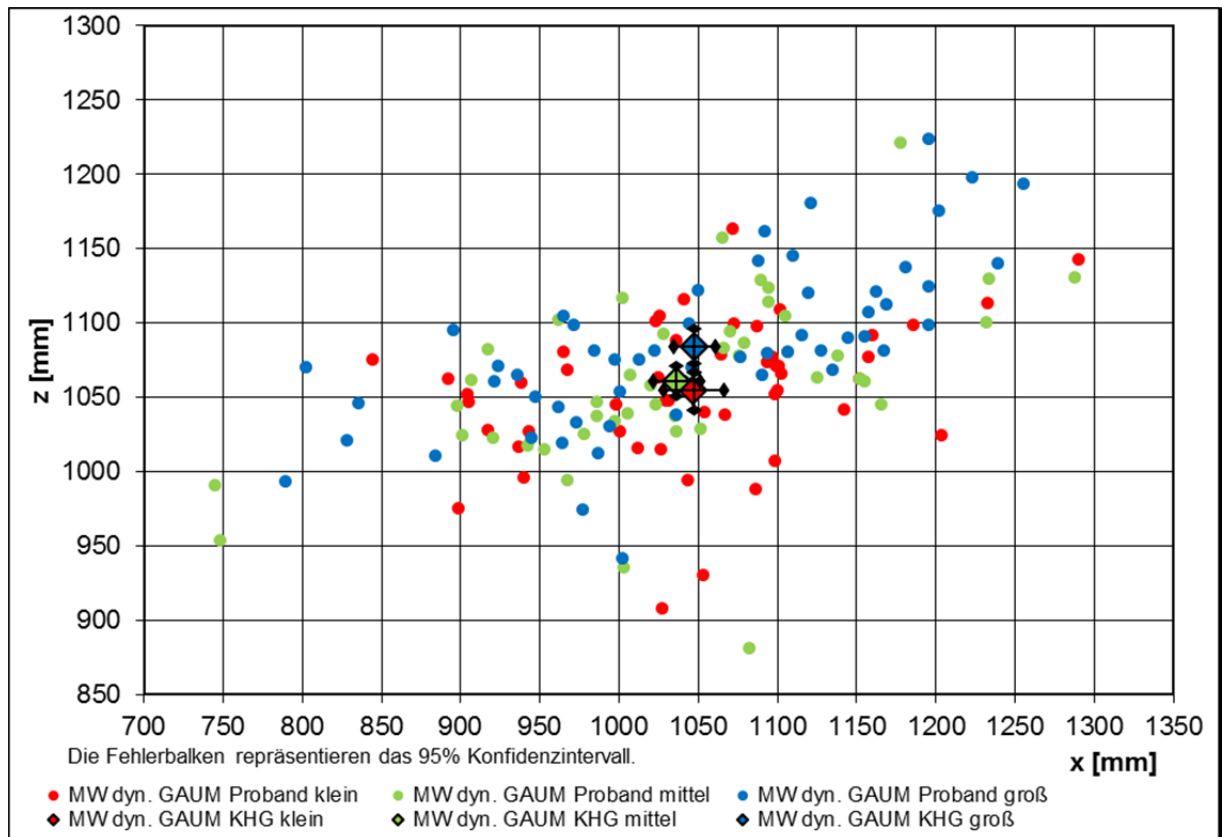


Abbildung 4-17: Einfluss der Körperhöhe auf dyn. Augpunktlagen V1-V3 N = 152 Seitenansicht

Tabelle 4-5: Ergebnisse des t-Tests für unabhängige Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H3)

Vergleich	Mittelwertdifferenz [mm]	Standardabweichung (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (Cohen's $d$ )
MW dyn. GAUM KHG klein z - MW dyn. GAUM KHG groß z	29,46	51,91	0,002	0,57

Bei der Betrachtung der in Abbildung 4-17 dargestellten Augpunktlagenverteilungen fällt auf, dass die Mittelwert der kleinen und mittelgroßen Personengruppen sehr dicht beieinander liegen. Aus diesem Grund sollen innerhalb einer explorativen Untersuchung die z-Koordinate beider Randgruppen mit den Werten der KHG mittel verglichen werden. Dazu werden wiederum t-Tests für unabhängige Stichproben eingesetzt.

Aufgrund der explorativen Untersuchung kann lediglich eine zweiseitige Signifikanz bestimmt werden. Die explorativ ermittelten p-Werte werden unabhängig von den weiteren in dieser Arbeit berechneten p-Werten nach dem Verfahren von Hochberg (1988 S. 800 ff.) korrigiert. Nach der Durchführung der t-Tests und der Korrektur kann bei keinem der beiden Vergleiche ein signifikanter Unterschied berichtet werden (vgl. Tabelle 4-6). Der erste t-Test, der den Unterschied zwischen kleinen und mittelgroßen Personen untersucht, liefert die Werte (MWD = 5,80 mm;  $t(50) = 0,53$ ;  $p = 0,593$ ). Damit ist weder eine auslegungsrelevante Mittelwertdifferenz noch ein signifikanter Unterschied gegeben. Es wird somit festgestellt, dass sich diese beiden Gruppen bei der eingenommenen dynamischen Fahrhaltung im Merkmal der Augpunktlage nicht voneinander unterscheiden. Innerhalb des zweiten t-Tests werden die Körpergrößengruppen der mittleren und großen Probanden miteinander verglichen. Es werden die Werte (MWD = 23,66 mm;  $t(49) = 2,10$ ;  $p = 0,076$ ) berechnet. Es ist damit kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen feststellbar.



Tabelle 4-6: Ergebnisse der t-Tests für unabhängige Stichproben zur explorativen Untersuchung des Einflusses der Körperhöhe auf die Augpunktlagenhöhe

Vergleich	Mittelwertdifferenz [mm]	Standardabweichung (gemittelt) [mm]	Signifikanz (zweiseitig)	Effektstärke (Cohen's d)
MW dyn. GAUM KHG klein z - MW dyn. GAUM KHG mittel z	5,80	52,94	0,593	-
MW dyn. GAUM KHG mittel z - MW dyn. GAUM KHG groß z	23,66	56,50	0,076	-

Diese Ergebnisse untermauert die Beobachtung, dass es bei der dynamischen Nutzung eines Lkws eine sichtideale Augpunktlage innerhalb des Fahrerhauses gibt. Die Lkw-Fahrer versuchen unter den anthropometrischen Randbedingungen und persönlichen Präferenzen dieser idealen Augpunktlage so nahe wie möglich zu kommen. Die großen Lkw-Fahrer sind aufgrund ihrer Körperhöhe und der damit verbundenen Stammlänge nicht in der Lage ihre Augpunktlage frei einzustellen. Durch die untere Begrenzung des Sitzverstellfeldes ist es diesen Personen nicht möglich die sichtideale Augpunktlage, die eine bestmögliche Sicht ins Kombiinstrument und über die Spiegel ermöglicht, zu erreichen. Die mittelgroßen Personen haben aufgrund ihrer Körperhöhe die geringste Limitierung bei der Findung der Fahrhaltung. Sie können damit die Sitz- und Lenkradverstellfelder nach ihren individuellen Präferenzen ausschöpfen.

Durch den Randgruppenvergleich kann ein Einfluss der Körperhöhe (Faktor A) auf die z-Position der mittleren dynamischen Augpunktlage (dyn. GAUM) nachgewiesen werden. Hypothese 3 wird bestätigt. Dynamische Augpunktlagen kleiner Personen liegen im Vergleich zu den Kennwerten großer Personen tiefer (MWD = 29,46 mm) im Fahrerhaus.

#### 4.2.3 Einfluss des Taillenumfangs (Faktor B)

Die Population der Lkw-Fahrer unterscheidet sich von der Gesamtbevölkerung im anthropometrischen Merkmal des Taillenumfangs (vgl. Jürgens 1999 B-1.2.80; Jürgens et al. 2000 S. 31). Damit ist bei dieser Personengruppe eine Abhängigkeit der Augpunktlage von der Korpulenz der Probanden zu untersuchen. Die Pedalanlage der eingesetzten Versuchsfahrzeuge kann nicht eingestellt werden. Der Sitz, das Lenkrad und die Spiegel können jedoch den Bedürfnissen des Fahrers innerhalb der jeweiligen Kennfelder angepasst werden. Korpulente Fahrer benötigen aufgrund ihrer Körperfülle mehr Platz zu angrenzenden Bedienelementen. So können schlanke Fahrer beispielsweise das Lenkrad weiter als korpulente Fahrer an ihren Hüftpunkt heranziehen. Diese Einschränkungen können einen Einfluss auf die gefundene Fahrhaltung und damit auf die dynamische Augpunktlage haben. Es wurde daher folgende Hypothese aufgestellt:

**Hypothese 4:** Die dynamischen Augpunktlagen schlanker Probanden liegen in Fahrzeugfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen korpulenter Probanden. (H4)

Die Definition der Faktorstufen ist in Kapitel 3.1.2 beschrieben. Die Gesamtstichprobe wird zur Analyse des Einflusses des Taillenumfangs (TU) in drei Körpermaßgruppen (KMG) eingeteilt. Die schlanken  $n = 25$  Probanden ( $TU \leq 931$  mm) bilden die untere Randgruppe (KMG schlank). Die Gruppe der mittelpululenten Personen (KMG mittel;  $931 \text{ mm} < TU \leq 1032$  mm) besteht aus  $n = 55$  Probanden. Die obere Randgruppe (KMG korpulent) beinhaltet  $n = 72$  korpulente Personen ( $TU > 1032$  mm). Die x- und z-Komponenten der probandenindividuellen Mittelwerte der dynamischen Augpunktlagen (MW dyn. GAUM Proband) und der Mittelwerte der jeweiligen Körpermaßgruppe sind in Abbildung 4-18 dargestellt. Die y-Komponente der Augpunktlagen ist in Anhang A7 visualisiert.

Die Werte innerhalb der einzelnen Körpermaßgruppen sind normalverteilt. Die Stichprobenumfänge unterscheiden sich jedoch aufgrund der Einteilung nach Jürgens et al. (2000 S. 31) voneinander. Durch die Gesamtstichprobe wird die Gruppe der korpulenten Personen überproportional repräsentiert (vgl. Kapitel 3.3.6). Dieser Umstand ist möglicherweise auf die Akzeleration des Taillenumfangs in den 12 Jahren zwischen Reihenmessung und Versuchsdurchführung zurückzuführen. Er kann auch auf die lokal begrenzte Akquise aus der Teilmenge der Lkw-Fahrerpopulation beruhen. Der Umstand der unterschiedlichen Verteilung der Gesamtstichprobe ist jedenfalls erwähnenswert.

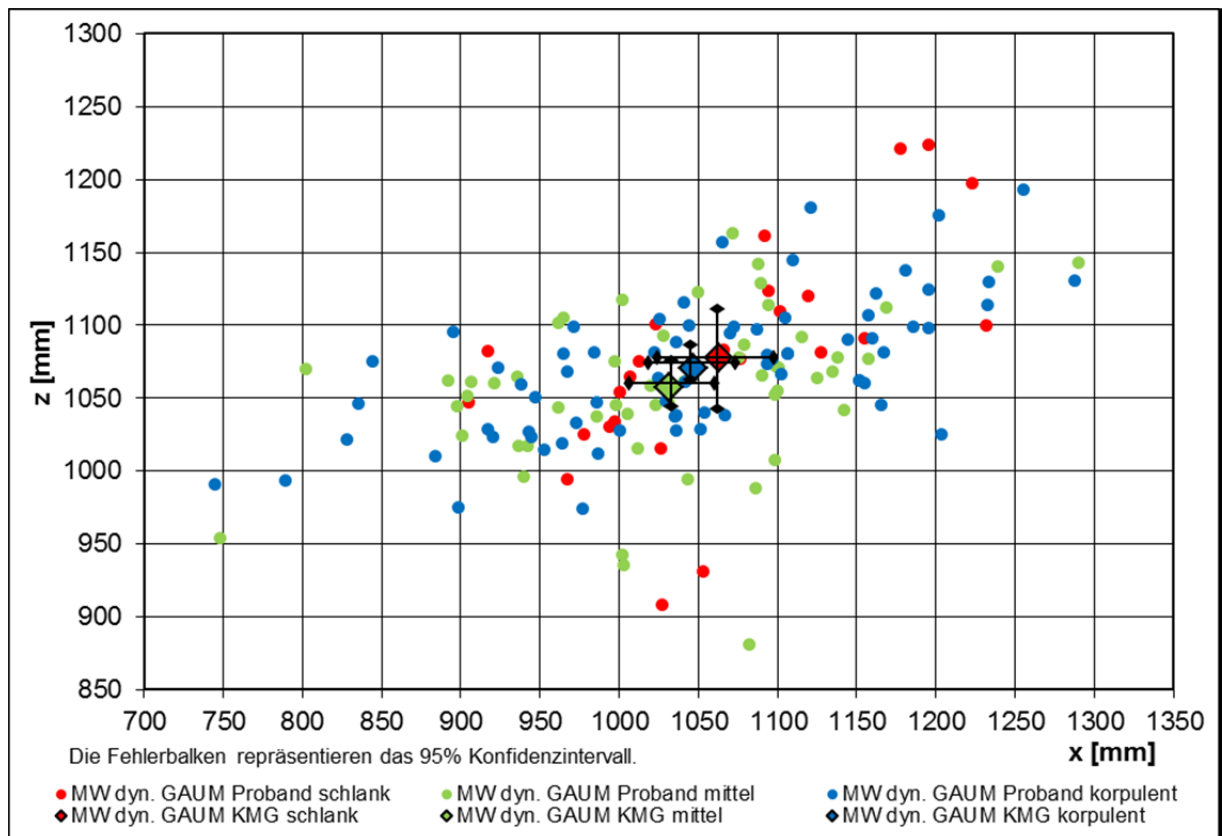


Abbildung 4-18: Einfluss des Taillenumfangs auf dyn. Augpunktlagen V1-V3 N = 152 Seitenansicht

Der Einfluss des Taillenumfangs auf die dynamische Augpunktlagenverteilung wird durch eine Varianzanalyse (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 472; Maxwell 1990 S. 63; Field 2013 S. 460) untersucht. Mittels der einfaktoriellen ANOVA wird festgestellt, dass sich die Augpunktlagen der Körpermaßgruppen in ihrer x-Lage nicht signifikant ( $F(2,149) = 0,79$ ;  $p = 0,463$ ) unterscheiden. Es kann kein Einfluss des Taillenumfangs auf die Position der mittleren dynamischen Augpunktlagen in Fahrzeuginnenraumrichtung nachgewiesen werden. Die Hypothese 4 wird damit nicht bestätigt.

#### 4.2.4 Einfluss der Fahrzeugvariante (Faktor C)

In ihrer Untersuchung kann Fröhmel (2010 S. 82 f.) einen Einfluss der Fahrzeugvariante auf die probandenindividuelle statische Fahrhaltung nachweisen. Wie im Feldversuch von Scholly (2002 S. 26 f.) gezeigt wurde, ist die dynamische Augpunktlage und das Blickverhalten im Pkw von den Sichteinschränkungen abhängig. Die Abhängigkeit der Augpunktlagenverteilung von der Fahrzeugvariante soll durch die Analyse der während dynamischer Sichtsituationen im Lkw aufgezeichneten Augpunktlagen untersucht werden:

**Hypothese 5:** Die dynamischen Augpunktlagenverteilungen verschiedener Fahrzeugvarianten unterscheiden sich. (H5)

Innerhalb dieser Untersuchung können drei Faktorstufen der Fahrzeugvariante (Faktor C) unterschieden werden. Dies sind die Gliederzugkombination mit breitem und hoch aufgesetztem Fahrerhaus (V1;  $n = 48$ ), der Sattelzug mit breiter und hoch aufgesetzter Kabine (V2;  $n = 49$ ) und die Sattelzugkombination mit schmalem und niedrig aufgesetztem Fahrerhaus (V3;  $n = 55$ ) (vgl. Kapitel 3.1.3). Die probandenindividuellen Mittelwertlagen und die Mittelwerte der Fahrzeugvarianten sind in x- und z-Richtung in Abbildung 4-19 zusammengestellt. Die y-Komponente der Augpunktlagenverteilungen ist in der Draufsicht (vgl. Abbildung 4-20) dargestellt.

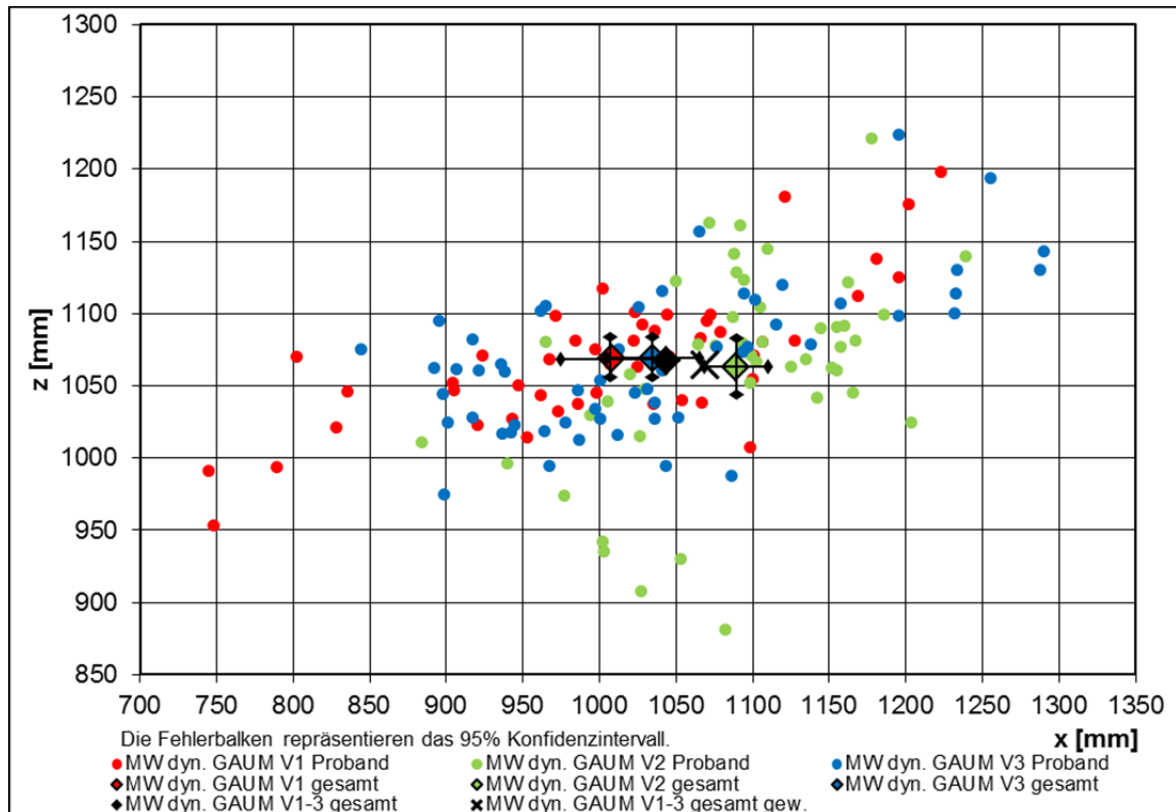


Abbildung 4-19: Einfluss der Fahrzeugvariante auf dyn. Augpunktlagen V1-V3 N = 152 Seitenansicht

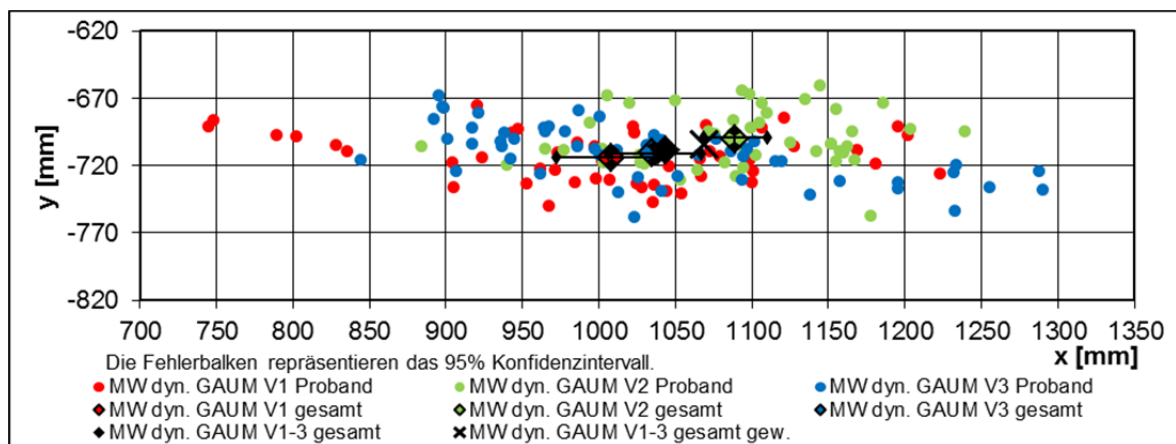


Abbildung 4-20: Einfluss der Fahrzeugvariante auf dyn. Augpunktlagen V1-V3 N = 152 Draufsicht

Zur Bearbeitung der Unterschiedshypothese H5 wird zunächst für jede Achsrichtung (x, y, z) eine eigenständige Varianzanalyse für unabhängige Stichproben (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 472; Maxwell 1990 S. 63; Field 2013 S. 460) durchgeführt. Demnach unterscheiden sich die x-Werte mit ( $F(2,149) = 8,00$ ;  $p = 0,001$ ) und die y-Werte mit ( $F(2,149) = 6,76$ ;  $p = 0,002$ ) der drei Fahrzeugvarianten signifikant voneinander. Bei den z-Werten mit ( $F(2,149) = 0,17$ ;  $p = 0,844$ ) ist zwischen den Faktorstufen kein signifikanter Unterschied feststellbar.

Die Mittelwerte der einzelnen Fahrzeugvarianten werden in x- und y-Richtung mit dem Post Hoc GT2-Test nach Hochberg (vgl. Hochberg 1974 S. 224 ff.; Field 2013 S. 459) paarweise verglichen. Dieser Test wird ausgewählt da er den Mehrfachvergleich mit unterschiedlichen Stichprobengrößen zulässt. Bei dem der einfaktoriellen ANOVA nachgeschalteten GT2-Test wurden die p-Werte bereits korrigiert und müssen daher nicht nochmals korrigiert werden. In Tabelle 4-7 sind die Ergebnisse des GT2-Test nach Hochberg dargestellt. Fahrzeugvariante V2 unterscheidet sich in x- und y-Richtung signifikant von den beiden weiteren Faktorstufen. Zwischen den Fahrzeugen V1 und V3 ist weder in x-Richtung mit ( $p = 0,452$ ) noch in z-Richtung mit ( $p = 0,800$ ) ein signifikanter Unterschied zu berichten.

Tabelle 4-7: Ergebnisse der GT2-Tests nach Hochberg zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H5)

Vergleich	Mittelwertdifferenz [mm]	Standardabweichung (gemittelt) [mm]	Signifikanz (zweiseitig)	Effektstärke (Cohen's d)
MW dyn. GAUM V1 gesamt x - MW dyn. GAUM V2 gesamt x	80,67	95,15	<0,001	0,85
MW dyn. GAUM V1 gesamt x - MW dyn. GAUM V3 gesamt x	26,84	112,66	0,452	-
MW dyn. GAUM V2 gesamt x - MW dyn. GAUM V3 gesamt x	53,85	95,27	0,023	0,57
MW dyn. GAUM V1 gesamt y - MW dyn. GAUM V2 gesamt y	13,90	19,26	0,002	0,72
MW dyn. GAUM V1 gesamt y - MW dyn. GAUM V3 gesamt y	3,16	19,39	0,800	-
MW dyn. GAUM V2 gesamt y - MW dyn. GAUM V3 gesamt y	10,74	20,17	0,018	0,53

Die Mittelwerte der Fahrzeuge V1 (MW dyn. GAUM V1 gesamt x) und V2 (MW dyn. GAUM V2 gesamt x) unterscheiden sich mit einer großen Effektstärke ( $d = 0,85$ ) und einer Mittelwertdifferenz (MWD) von 80,67 mm in Fahrzeuginnenrichtung voneinander. In derselben Richtung weisen die Werte der Fahrzeuge V2 (MW dyn. GAUM V2 gesamt x) und V3 (MW dyn. GAUM V3 gesamt x) eine Mittelwertdifferenz von 53,85 mm und einen mittleren Effekt ( $d = 0,57$ ) auf. In Fahrzeugquerrichtung liegt ein vergleichbarer Zusammenhang vor. V1 und V2 unterscheiden sich mit MWD = 13,90 mm und  $d = 0,72$ . V2 und V3 besitzen eine Mittelwertdifferenz von 10,74 mm und eine Effektstärke von  $d = 0,53$ . Damit unterscheidet sich die Augpunktlagenverteilungen der Fahrzeuge V1 und V3 auslegungsrelevant von der Augpunktlagenverteilung in V2.

In Abbildung 4-19 und Abbildung 4-20 ist neben den fahrzeugindividuellen Mittelwerten auch ein Mittelwert über alle drei Fahrzeugvarianten (MW dyn. GAUM V1-3 gesamt) dargestellt. Eine gesamtheitliche Betrachtung der drei unterschiedlichen Fahrzeugvarianten (V1-3) durch einen Auslegungsaugpunkt ist notwendig um Systeme, wie das Kombiinstrument, das in jedem Fahrzeug gleich verortet werden soll, auszulegen. Da die Fahrzeugvariante V2 die wichtigste Fahrzeugkombination für den schweren Fernverkehrseinsatz (vgl. Shell 2010 S. 19 f., Daimler 2011a S. 56 ff.) repräsentiert und sich in der Augpunktlagenverteilung stark von den Fahrzeugen V1 und V3 unterscheidet ist auch eine Gewichtung zwischen den Fahrzeugvarianten auf Grundlage der Verkaufszahlen denkbar. Die gewichtete mittlere Augpunktlage (MW dyn. GAUM V1-3 gesamt gew.) bei der das Fahrzeug V2 mit 70% und die Fahrzeuge V1 und V3 mit jeweils 15% eingehen repräsentiert die Auslieferungshäufigkeit der jeweiligen Fahrzeugvariante.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die dynamische Augpunktlagenverteilung von der Fahrzeugvariante abhängig ist. Damit wird die Unterschiedshypothese H5 bestätigt. Die weitere Analyse der Augpunktlagenverteilungen wird nach dieser Erkenntnis anhand der Daten aus Fahrzeugvariante V2 durchgeführt.

#### 4.2.5 Einfluss der Sichtsituation (Faktor D)

In Kapitel 1.1.4 wurden die zur Erfüllung der Fahraufgabe innerhalb einer Sichtsituation notwendigen Sichtbereiche und die vom Fahrer initiierten Kopfbewegungen beschrieben. Die während der Fahraufgabe zu durchfahrenden Verkehrssituationen können nach unterschiedlichen Kriterien klassifiziert werden (vgl. Schweigert 2002 S. 19 ff.). Die Faktorstufen der Sichtsituation sind in Kapitel 3.1.4 definiert. Je Fahrstreckenkategorie kann zwischen sog. Baseline-Sichtsituationen und Szenarien mit hoher Komplexität unterschieden werden. Da bei den betrachteten Nutzfahrzeugvarianten die Spurhaltung bei Fahrtrichtungsänderungen während komplexer Sichtsituationen über die indirekte Sicht kontrolliert werden muss, wird angenommen, dass die Häufigkeit der Spiegelsicht von der Komplexität der dynamischen Sichtsituationen abhängt.

**Hypothese 6:** Bei komplexen Sichtsituationen wird häufiger als bei Baseline-Sichtsituationen in die Spiegel geblickt. (H6)



Da die Landstraßen-Szenarien aus vier unterschiedlich komplexen Sichtsituationen bestehen, werden sie zur Untersuchung der gerichteten Unterschiedshypothese H6 herangezogen. Es werden die Kreisverkehrsdurchfahrt (S06), das Linksabbiegen auf eine Vorfahrtstraße (S07) und das Rechtsabbiegen unter spitzem Winkel (S08) mit der Überlandfahrt (S05) verglichen (vgl. Kapitel 3.1.4). Als Bewertungsmaß wird die normierte Häufigkeit der Spiegelblicke eingeführt. Sie beschreibt die Anzahl der Blicke in die Spiegel (AOI03-06) bezogen auf die Anzahl der Blicke durch die Scheibenflächen (AOI07-11). Wird zum Zweck der Spiegelsicht durch die Seitenscheibe geblickt wird diese Fixation ausschließlich als Blick in den Spiegel und nicht als Blick durch die Scheibe gezählt. Bei der normierten Häufigkeit kann nicht für alle untersuchten Gruppen eine Normalverteilung festgestellt werden. Daher werden als Vergleichsgrößen die Medianwerte herangezogen (vgl. Abbildung 4-21).

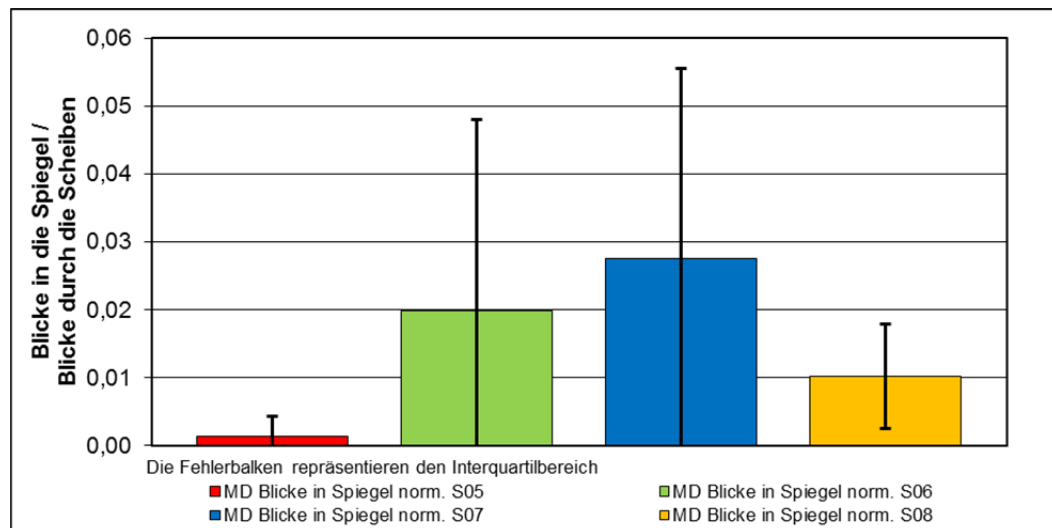


Abbildung 4-21: Normierte Häufigkeit der Spiegelblicke V2 n = 46

Es wird die Verteilung der probandenindividuellen normierten Häufigkeit der Spiegelblicke für unterschiedliche Sichtsituationen miteinander verglichen. Daher wird der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für verbundene Stichproben (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 213; Siegel & Castellan 1988 S. 87; Bortz et al. 1990 S. 259; Field 2013 S. 228) zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H6) herangezogen. Die Verteilung der Blicke unterscheidet sich für Sichtsituation S6 mit (STS = 5,58;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,58$ ), für S7 mit (STS = 4,98;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,52$ ) und S08 (STS = 4,21;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,44$ ) mit einer mittleren Effektstärke signifikant von der Baseline-Sichtsituation S05. Die Werte der Mediandifferenz sind aufgrund der Häufigkeitsbetrachtung bedingt aussagekräftig (vgl. Tabelle 4-8). Durch den Vergleich der relativen Häufigkeit kann berichtet werden, dass während der Kreisverkehrsdurchfahrt (S06) im Mittel 14mal so oft, beim Linksabbiegen auf eine Vorfahrtstraße (S07) im Mittel 20mal so oft und beim Rechtsabbiegen unter spitzem Winkel (S08) im Mittel 7mal so oft wie während der Geradeausfahrt (S05) in den Spiegel geblickt wird.

Tabelle 4-8: Ergebnisse der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H6)

Vergleich	Mediandifferenz [mm]	Interquartilbereich (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (r)
MD Blicke in Spiegel norm. S05 – MD Blicke in Spiegel norm. S06	0,019	0,031	< 0,001	0,58
MD Blicke in Spiegel norm. S05 – MD Blicke in Spiegel norm. S07	0,026	0,031	< 0,001	0,52
MD Blicke in Spiegel norm. S05 – MD Blicke in Spiegel norm. S08	0,009	0,011	< 0,001	0,44

Für die betrachteten Landstraßen-Sichtsituationen kann zusammenfassend festgestellt werden, dass bei komplexen Sichtsituationen häufiger als bei Baseline-Sichtsituationen in den Spiegel geblickt wird. Die gerichtete Unterschiedshypothese H6 wird bestätigt. Die visuelle Komplexität einer Sichtsituation kann somit anhand der normierten Häufigkeit der Spiegelblicke beschrieben werden.

Die x- und z-Komponenten aller aufgezeichneten Augpunktlagen während der Geradeausfahrt (S05) und der Kreisverkehrsdurchfahrt (S06) sind exemplarisch in Abbildung 4-22 in einer Seitenansicht dargestellt. Die y-Koordinate ist in Abbildung 4-23 visualisiert. Exemplarisch sind die Messpunkte einer kleinen (VP43), einer mittelgroßen (VP58) und einer großen Versuchsperson (VP56) hervorgehoben. Der situationsindividuelle Mittelwert ist ebenfalls aufgetragen. Es kann festgestellt werden, dass sich die beiden Situationen sowohl in der Mittelwertlage als auch in der Streubreite unterscheiden. Der Mittelwert der komplexen Sichtsituation (S06) liegt weiter vorne und tiefer, die Streubreite in x- und y-Richtung ist stärker als bei der Baseline-Sichtsituation (S05) ausgeprägt.

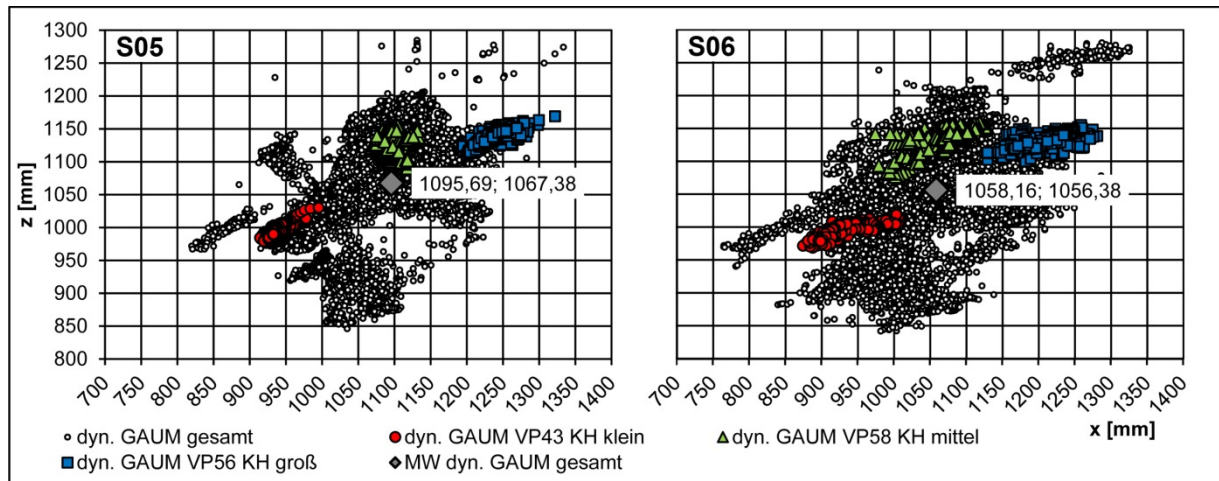


Abbildung 4-22: Vergleich dyn. GAUM S05 (V2; n = 35.659) und S06 (V2; n = 20.588) Seitenansicht

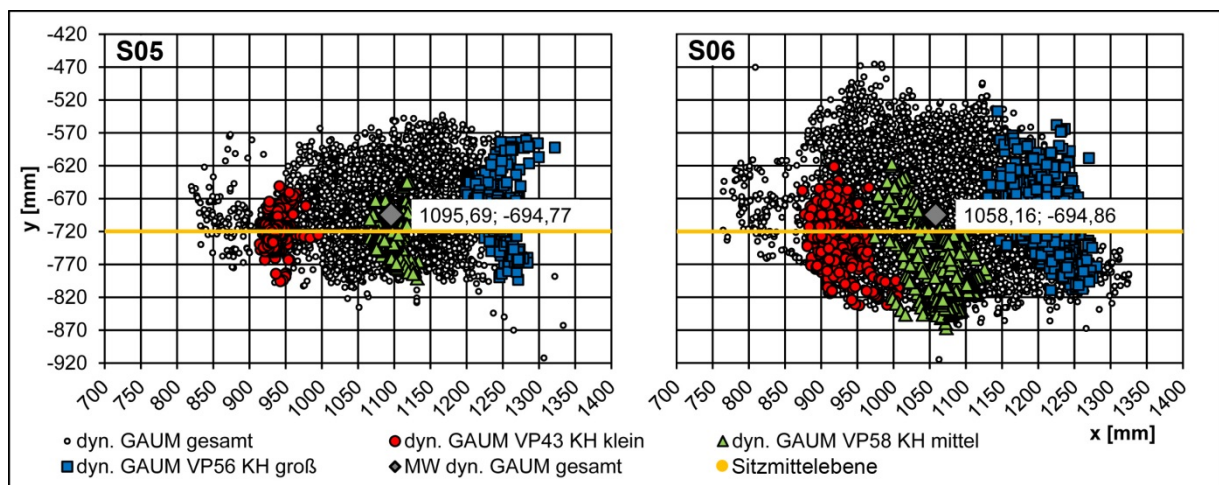


Abbildung 4-23: Vergleich dyn. GAUM S05 (V2; n = 35.659) und S06 (V2; n = 20.588) Draufsicht

Zaindl (2014 S. 2) berichtet von ausgeprägten Kompensationsbewegungen der Augpunktlage in Fahrzeuglängsrichtung beim Blick in die Hauptspiegel eines Lkws. Die dynamische Kopfbewegung wird vom Fahrer zur Verschiebung des dargestellten Sichtbereichs eines konventionellen Spiegelsystems eingesetzt. Dadurch können in komplexen Sichtsituationen Sichtziele außerhalb des üblichen Sichtbereichs der indirekten Sicht erschlossen werden. Es wird vermutet, dass die Komplexität der Sichtsituation einen Einfluss auf die mittlere Augpunktlagen der Fahrer hat. Diese Annahme soll mit der folgenden gerichteten Unterschiedshypothese untersucht werden:

**Hypothese 7:** Die dynamischen Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen liegen in Fahrzeugfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen bei Baseline-Sichtsituationen. (H7)

Die probandenindividuellen Augpunktlagen aller betrachteten Sichtsituationen (S05-S08) liegen normalverteilt vor. Daher wird der Einfluss der Faktorstufen anhand der Mittelwerte miteinander verglichen (vgl. Abbildung 4-24). Es werden die probandenindividuellen Mittelwerte (MW dyn. GAUM Proband) und die Gesamtmittelwerte (MW dyn. GAUM gesamt) der vier Sichtsituationen dargestellt.

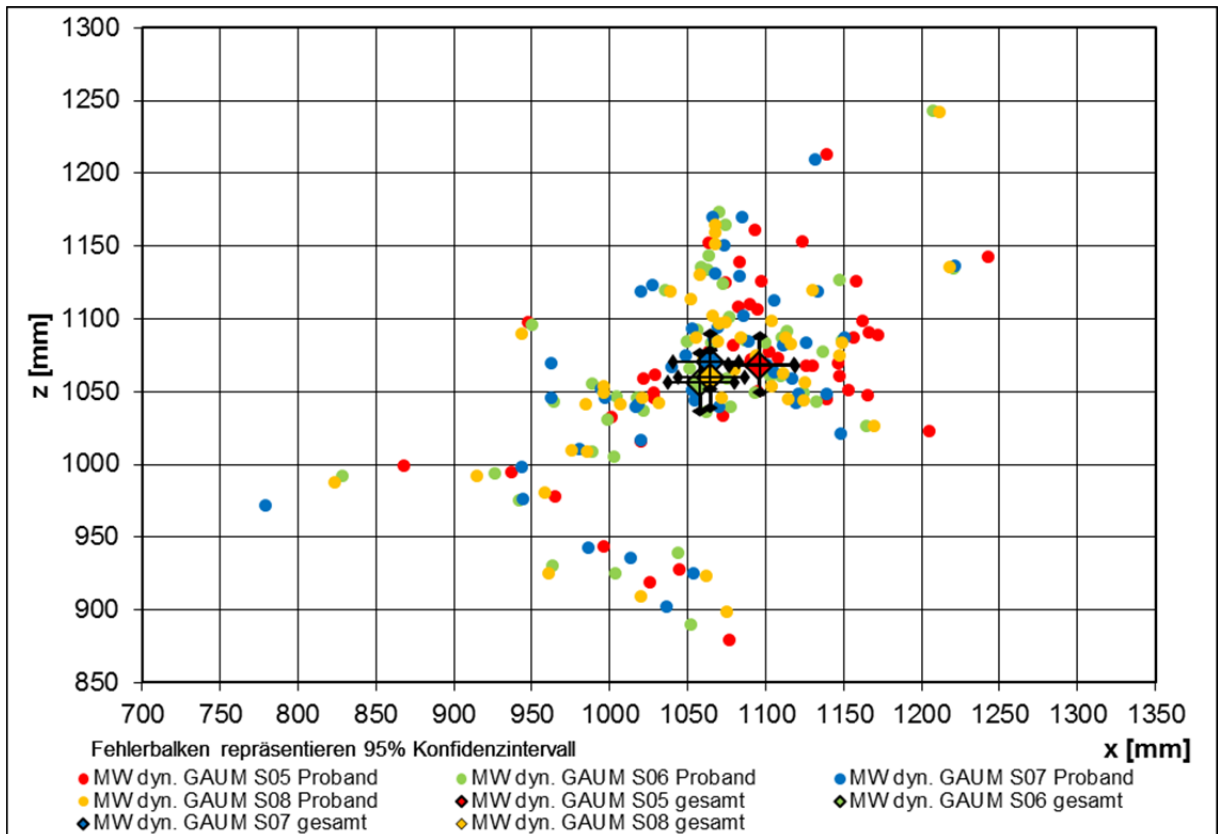


Abbildung 4-24: Einfluss der Sichtsituation S05-S08 auf die dyn. Augpunktlage V2 n = 46  
Seitenansicht

Zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H7) wird der t-Test für verbundene Stichproben (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 414; Wilcox 1996 S. 240; Field 2013 S. 378) verwendet. Die x-Koordinate der Situation S06 ( $t(45) = 7,26$ ;  $p < 0,001$ ;  $d = 0,37$ ) der Situation S07 ( $t(45) = 7,39$ ;  $p < 0,001$ ;  $d = 0,39$ ) und der Situation S08 ( $t(45) = 6,80$ ;  $p < 0,001$ ;  $d = 0,33$ ) unterscheiden sich signifikant von den Werten der Baseline-Situation S05. Die Mittelwertdifferenz (MWD) liegt für S05-S06 bei 27,34 mm, für S05-S07 bei 28,51 mm und für S05-S08 bei 24,66 mm und damit durchgehend im auslegungsrelevanten Bereich (vgl. Tabelle 4-9).

Durch diese Untersuchung kann eine Abhängigkeit der Verteilung dynamischer Augpunktlagen von der Komplexität der Sichtsituation nachgewiesen werden. Die Messwerte der Sichtsituationen S06-08 liegen in Fahrzeugfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen der Baseline-Sichtsituation (S05). Die gerichtete Unterschiedshypothese H7 wird bestätigt.

Tabelle 4-9: Ergebnisse der t-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H7)

Vergleich	Mittelwertdifferenz [mm]	Standardabweichung (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (Cohen's d)
MW dyn. GAUM S05 gesamt x – MW dyn. GAUM S06 gesamt x	27,34	73,71	< 0,001	0,37
MW dyn. GAUM S05 gesamt x – MW dyn. GAUM S07 gesamt x	28,51	73,25	< 0,001	0,39
MW dyn. GAUM S05 gesamt x – MW dyn. GAUM S08 gesamt x	24,66	74,09	< 0,001	0,33

Um neben den untersuchten Sichtsituationen auf der Landstraße auch die weiteren Sichtsituationen in der Stadt- und auf der Autobahn mit in die Betrachtungen einzubeziehen, werden nun jeweils eine komplexe Sichtsituation aller drei Fahrstreckenkategorien miteinander verglichen. Es wurde folgende gerichtete Unterschiedshypothese aufgestellt:

### Hypothese 8:

Die dynamischen Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen, während der Stadt- oder Überlandfahrt, liegen in Fahrzeugfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen, während der Autobahnfahrt. (H8)

Zur Untersuchung der Fahrstreckenkategorien werden das Rechtsabbiegen in der Stadt (S02) und die Kreisverkehrsdurchfahrt (S06) im Vergleich zum Überhohlmanöver auf der Autobahn (S10) ausgewählt. Die dynamischen Augpunktlagen jeder Sichtsituation liegen normalverteilt vor und die Mittelwerte der x- und z-Koordinaten sind in Abbildung 4-25 dargestellt.

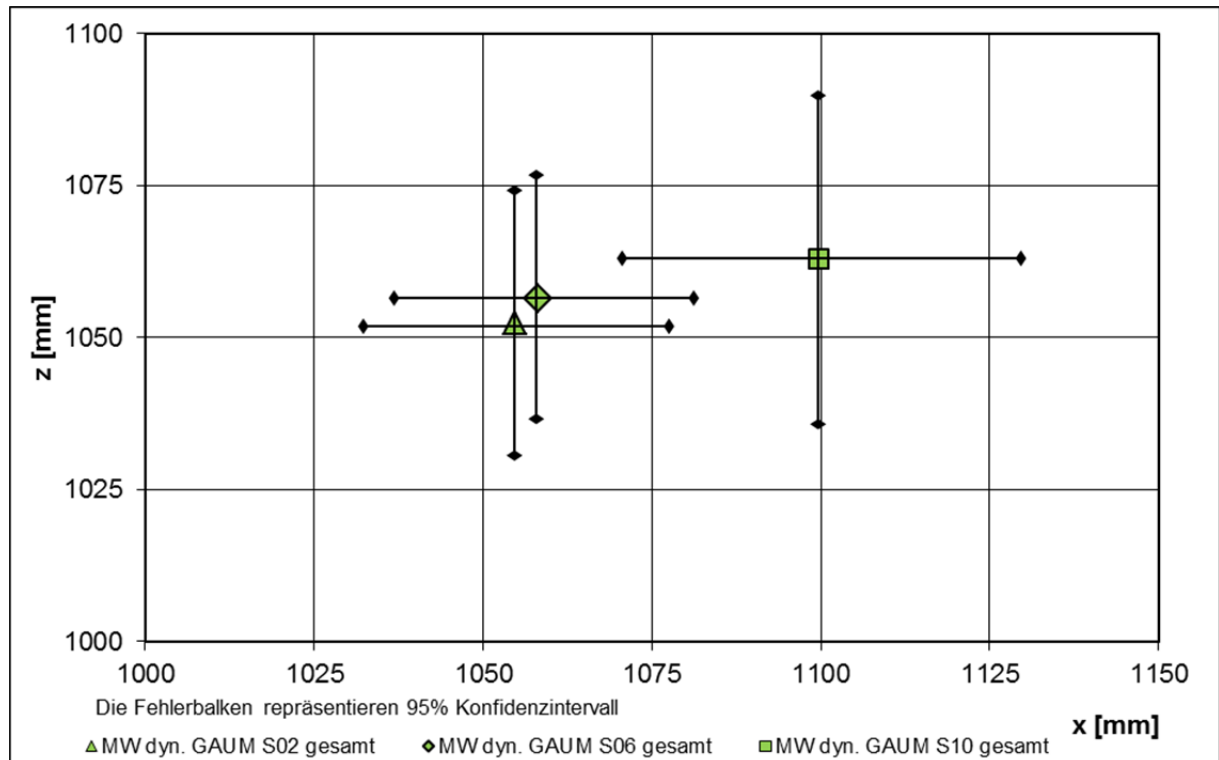


Abbildung 4-25: Einfluss der Sichtsituation S02, S06 und S10 auf die dyn. Augpunktlage V2 n = 46  
Seitenansicht

Zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H8) wird der t-Test für verbundene Stichproben (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 414; Wilcox 1996 S. 240; Field 2013 S. 378) verwendet. Die x-Koordinate der Situation S02 ( $t(45) = 2,79$ ;  $p = 0,005$ ;  $d = 0,48$ ) und der Situation S06 ( $t(45) = 2,78$ ;  $p = 0,005$ ;  $d = 0,44$ ) unterscheiden sich signifikant von den Werten der Situation S10. Die Mittelwertdifferenz (MWD) liegt für S10-S02 bei 37,93 mm und für S10-S06 bei 36,58 mm und damit jeweils im auslegungsrelevanten Bereich (vgl. Tabelle 4-10).

Tabelle 4-10: Ergebnisse der t-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H8)

Vergleich	Mittelwertdifferenz [mm]	Standardabweichung (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (Cohen's d)
MW dyn. GAUM S10 gesamt x – MW dyn. GAUM S02 gesamt x	37,93	78,96	0,005	0,48
MW dyn. GAUM S10 gesamt x – MW dyn. GAUM S06 gesamt x	36,58	73,18	0,005	0,44

Durch diesen Test wird gezeigt, dass die komplexen Sichtsituationen innerhalb der Stadt- und Überlandfahrten im Vergleich zur Autobahnsituation zu in Fahrzeugintrichtung nach vorne verschobenen Augpunktlagenverteilungen führen. Die gerichtet Unterschiedshypothese H8 wird damit bestätigt. Es kann auch berichtet werden, dass fahrstreckenabhängig unterschiedliche Niveaus der Komplexität dynamischer Sichtsituationen existieren. Autobahnsituationen sind weniger komplex als Stadt- oder Überlandsituationen.



Um den Einfluss der Sichtsituationen nicht nur auf die Mittelwertlage sondern auch auf die Streuung innerhalb der Augpunktlagenverteilungen zu untersuchen, wird das Maß der Streubreite eingeführt. In Abbildung 4-26 sind die konstruktiven Zusammenhänge zur Beschreibung der Streubreite anhand den probandenindividuellen dynamischen Offsetwerten dargestellt. Im Unterschied zu der in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Streubreite werden nun für jeden Proband die Abstandswerte zwischen den jeweiligen Messwerten innerhalb einer Sichtsituation (dyn. GAUM Proband) und dem Mittelwert dieser Sichtsituation (MW dyn. GAUM Proband) bestimmt. Aus den Offsetwerten der einzelnen Achsenrichtungen (x, y, z) wird der dreidimensionale Abstandswert (3D) berechnet.

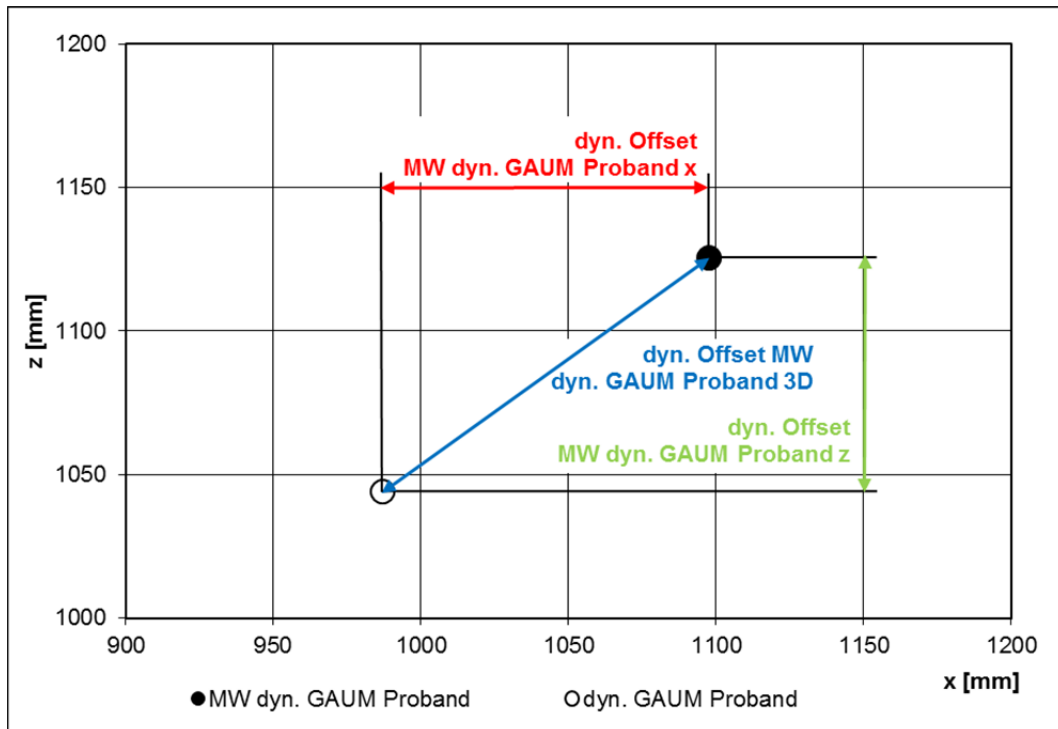


Abbildung 4-26: Ermittlung der probandenindividuellen dynamischen Offsetwerte zum MW GAUM Proband zur Beschreibung der Streubreite

Um den Einfluss der Komplexität einer Sichtsituation auf die Streubreite der dynamischen Augpunktlagenverteilungen zu untersuchen wurde folgende gerichtete Unterschiedshypothese aufgestellt:

**Hypothese 9:** Die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen ist größer als die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei Baseline-Sichtsituationen. (H9)

Nicht alle Messwerte der jeweiligen Offsetbetrachtung liegen normalverteilt vor. Daher werden zum Vergleich der situationsabhängigen Abstandswerte sowohl die Mittelwerte (MW) als auch die Medianwerte (MD) herangezogen. Ist eine der beiden Gruppen des paarweisen Vergleichs nicht normalverteilt, so werden die Medianwerte miteinander verglichen. In Abbildung 4-27 sind die Mittelwerte samt 95% Konfidenzintervall und die Medianwerte samt Interquartilbereich dargestellt.

Zum Vergleich der Mittelwerte werden t-Tests für verbundene Stichproben (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 414; Wilcox 1996 S. 240; Field 2013 S. 378) verwendet. Die mittleren Offsetwerte in x-Richtung der Situation S06 ( $t(45) = 10,45$ ;  $p < 0,001$ ;  $d = 1,74$ ) und der Situation S08 ( $t(45) = 11,29$ ;  $p < 0,001$ ;  $d = 1,65$ ) unterscheiden sich signifikant von den Werten der Situation S05. Die Mittelwertdifferenz (MWD) liegt für S05-S06 bei 16,18 mm und für S05-S08 bei 13,56 mm und damit jeweils mit sehr großen Effektstärken im beachtenswerten Bereich (vgl. Tabelle 4-11).

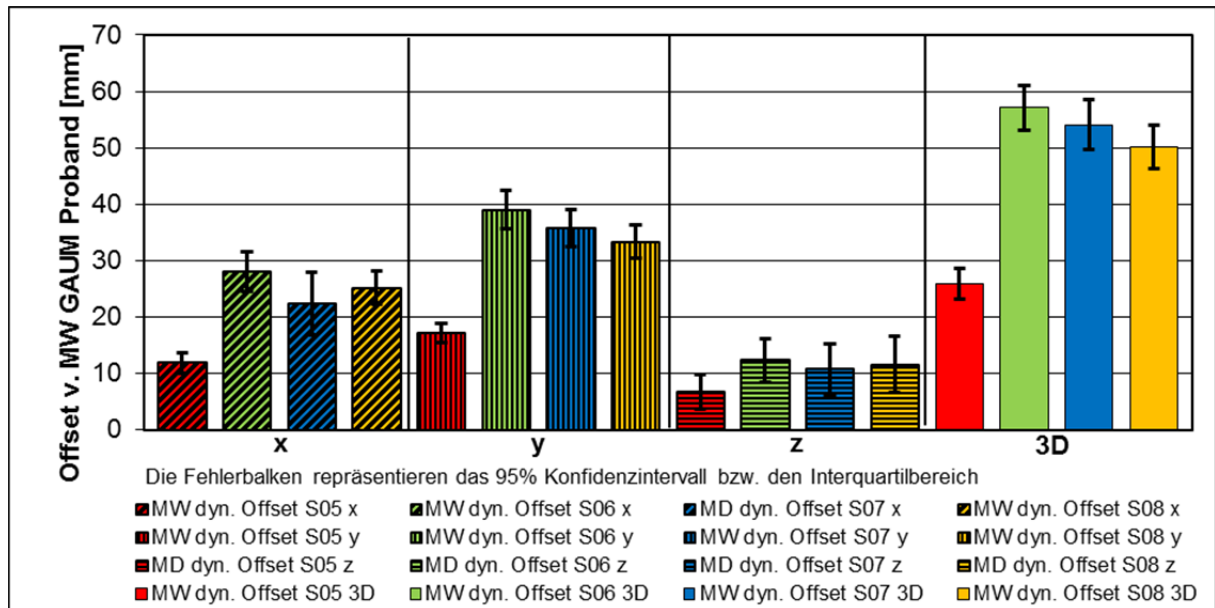


Abbildung 4-27: Streubreite der dynamische Augpunktlagen je Sichtsituation S05-08 V2 n = 46

Die Offsetwerte in y-Richtung der Situation S06 ( $t(45) = 12,55$ ;  $p < 0,001$ ;  $\bar{d} = 2,46$ ), der Situation S07 ( $t(45) = 10,78$ ;  $p < 0,001$ ;  $\bar{d} = 2,16$ ) und der Situation S08 ( $t(45) = 12,12$ ;  $p < 0,001$ ;  $\bar{d} = 2,03$ ) unterscheiden sich signifikant von den Werten der Situation S05. Die Mittelwertdifferenz (MWD) liegt für S05-S06 bei 21,95 mm, für S05-07 bei 18,63 mm und für S05-S08 bei 16,26 mm und damit jeweils mit sehr großen Effektstärken im auslegungsrelevanten Bereich (vgl. Tabelle 4-11).

Tabelle 4-11: Ergebnisse der t-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H9)

Vergleich	Mittelwert-differenz [mm]	Standardabweichung (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (Cohen's $\bar{d}$ )
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 x – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S06 x	16,18	9,28	< 0,001	1,74
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 x – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S08 x	13,56	8,09	< 0,001	1,65
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 y – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S06 y	21,95	8,93	< 0,001	2,46
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 y – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S07 y	18,63	8,61	< 0,001	2,16
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 y – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S08 y	16,26	8,02	< 0,001	2,03
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 3D – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S06 3D	31,12	11,43	< 0,001	2,72
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 3D – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S07 3D	28,09	12,46	< 0,001	2,25
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 3D – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S08 3D	24,23	11,15	< 0,001	2,17

Die mittleren dreidimensionalen Offsetwerte der Situation S06 ( $n = 46$ ;  $T = 15,06$ ;  $p < 0,001$ ;  $\bar{d} = 2,72$ ), der Situation S07 ( $t(45) = 13,22$ ;  $p < 0,001$ ;  $\bar{d} = 2,25$ ) und der Situation S08 ( $t(45) = 14,31$ ;  $p < 0,001$ ;  $\bar{d} = 2,17$ ) unterscheiden sich signifikant von den Werten der Situation S05. Die Mittelwertdifferenz (MWD) liegt für S05-S06 bei 31,12 mm, für S05-07 bei 28,09 mm und für S05-S08 bei 24,23 mm und damit jeweils mit sehr großen Effektstärken im auslegungsrelevanten Bereich (vgl. Tabelle 4-11).

Zum Vergleich der Medianwerte werden Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 213; Siegel & Castellan 1988 S. 87; Bortz et al. 1990 S. 259; Field 2013 S. 228) herangezogen. Der mittlere Offsetwert in x-Richtung der Situation S07

(STS = 5,87;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,61$ ) unterscheidet sich signifikant von den Werten der Situation S05. Die Mediandifferenz (MDD) liegt für S05-S07 bei 16,18 mm und mit mittlerer Effektstärken im beachtenswerten Bereich (vgl. Tabelle 4-12).

Die mittleren Offsetwerte in z-Richtung der Situation S06 (STS = 5,13;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,53$ ), der Situation S07 (STS = 5,09;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,53$ ) und der Situation S08 (STS = 5,02;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,52$ ) unterscheiden sich signifikant von den Werten der Situation S05. Die Mediandifferenz (MDD) liegt für S05-S06 bei 5,63 mm, für S05-S07 bei 3,95 mm und für S05-S08 bei 4,81 mm und damit jeweils mit mittleren Effektstärken nicht im auslegungsrelevanten Bereich (vgl. Tabelle 4-12).

Tabelle 4-12: Ergebnisse der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H9)

Vergleich	Mediandifferenz [mm]	Interquartilbereich (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (r)
MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 x – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S07 x	11,49	8,36	$< 0,001$	0,61
MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 z – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S06 z	5,63	6,93	$< 0,001$	0,53
MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 z – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S07 z	3,95	7,69	$< 0,001$	0,53
MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 z – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S08 z	4,81	8,02	$< 0,001$	0,52

Zusammenfassend kann berichtet werden, dass sich die Offsetwerte aller komplexen Sichtssituationen (S06-S08) von den Werten der Baseline-Sichtssituation (S05) signifikant unterscheiden. Die Differenzwerte der x- und y-Komponente sowie der resultierenden dreidimensionalen Betrachtung liegen jeweils im auslegungsrelevanten Bereich. Die gerichtete Unterschiedshypothese H9 wird damit bestätigt.

Um neben den untersuchten Sichtssituationen auf der Landstraße auch die weiteren Sichtssituationen in der Stadt und auf der Autobahn mit in die Betrachtungen einzubeziehen, werden nun jeweils eine komplexe Sichtssituation aller drei Fahrstreckenkatoren miteinander verglichen. Dieses Vorgehen ist konsistent zur Beurteilung der mittleren dynamischen Augpunktlagen mit Hilfe der gerichteten Unterschiedshypothese H8. Es wurde folgende gerichtete Unterschiedshypothese aufgestellt:

**Hypothese 10:** Die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei komplexen Sichtssituationen, während der Stadt- oder Überlandfahrt, ist größer als die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei komplexen Sichtssituationen, während der Autobahnfahrt. (H10)

Zum Vergleich der Fahrstreckenkatoren werden das Rechtsabbiegen in der Stadt (S02) und die Kreisverkehrsdurchfahrt (S06) in Bezug zum Überhohlmanöver auf der Autobahn (S10) betrachtet. Die Offsetwerte der Sichtssituation liegen wiederum teils normalverteilt teils nicht normalverteilt vor. Daher werden zum Vergleich der situationsabhängigen Abstandswerte sowohl die Mittelwerte (MW) als auch die Medianwerte (MD) herangezogen. Ist eine der beiden Gruppen des paarweisen Vergleichs nicht normalverteilt, so werden die Medianwerte miteinander verglichen. In Abbildung 4-28 sind die Mittelwerte samt 95% Konfidenzintervall und die Medianwerte samt Interquartilbereich dargestellt.

Zum Vergleich der Medianwerte werden Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 213; Siegel & Castellan 1988 S. 87; Bortz et al. 1990 S. 259; Field 2013 S. 228) herangezogen. Die mittleren Offsetwerte in x-Richtung der Situation S02 (STS = 3,90;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,50$ ) und S06 (STS = 4,66;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,59$ ) unterscheiden sich signifikant von den Werten der Situation S10. Die Mediandifferenz (MDD) liegt für S10-S02 bei 14,27 mm und für S10-S06 bei 13,74 mm und damit mit mittlerer Effektstärken im beachtenswerten Bereich (vgl. Tabelle 4-13).

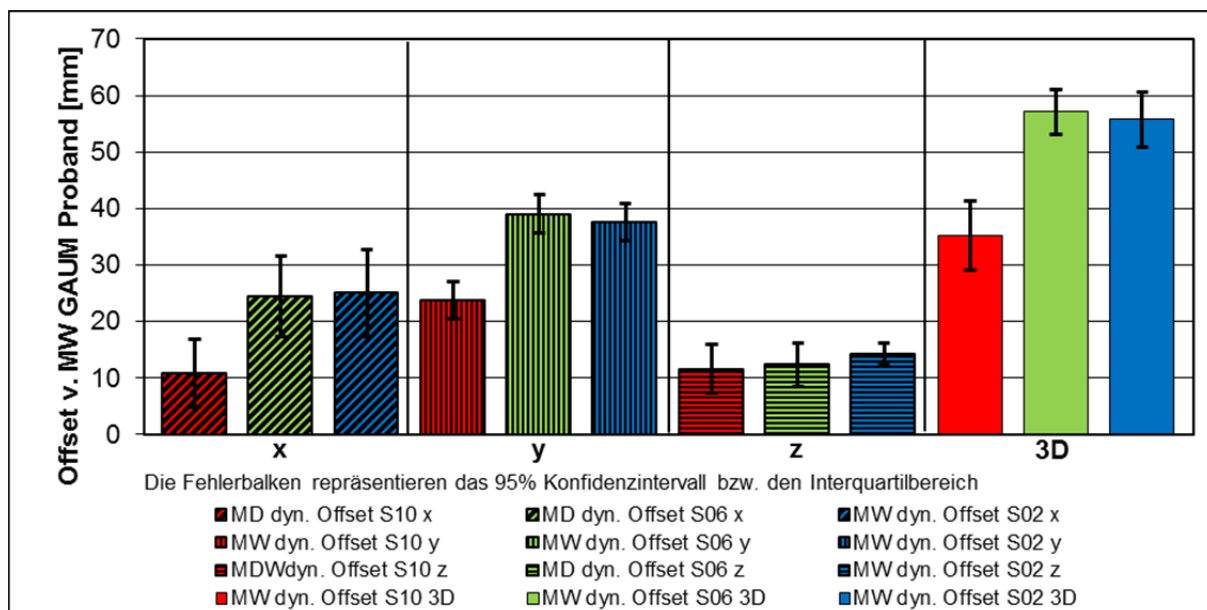


Abbildung 4-28: Streubreite der dynamische Augpunktlagen S10, S02 & S06 V2 n = 46

Tabelle 4-13: Ergebnisse der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H10)

Vergleich	Mediandifferenz [mm]	Interquartilbereich (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (r)
MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S10 x – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S02 x	14,27	13,73	< 0,001	0,50
MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S10 x – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S06 x	13,74	13,15	< 0,001	0,59

Zum Vergleich der Mittelwerte werden t-Tests für verbundene Stichproben (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 414; Wilcox 1996 S. 240; Field 2013 S. 378) verwendet. Die mittleren Offsetwerte in y-Richtung der Situation S02 ( $t(45) = 5,57$ ;  $p < 0,001$ ;  $d = 1,50$ ) und der Situation S06 ( $t(45) = 7,21$ ;  $p < 0,001$ ;  $d = 1,53$ ) unterscheiden sich signifikant von den Werten der Situation S10. Die Mittelwertdifferenz (MWD) liegt für S10-S02 bei 14,64 mm und für S10-S06 bei 14,03 mm und damit jeweils mit sehr großen Effektstärken im beachtenswerten Bereich (vgl. Tabelle 4-14).

Die mittleren Offsetwerte in z-Richtung der Situation S02 ( $t(45) = 0,97$ ;  $p = 0,180$ ) und der Situation S06 ( $t(45) = 0,78$ ;  $p = 0,231$ ) unterscheiden sich nicht signifikant von den Werten der Situation S10 (vgl. Tabelle 4-14).

Die mittleren dreidimensionalen Offsetwerte der Situation S02 ( $t(45) = 4,93$ ;  $p < 0,001$ ;  $d = 1,30$ ), und der Situation S06 ( $t(45) = 7,75$ ;  $p < 0,001$ ;  $d = 1,37$ ) unterscheiden sich signifikant von den Werten der Situation S10. Die Mittelwertdifferenz (MWD) liegt für S10-S02 bei 20,16 mm und für S10-S06 bei 20,26 mm und damit jeweils mit sehr großen Effektstärken im auslegungsrelevanten Bereich (vgl. Tabelle 4-14).

Zusammenfassend kann berichtet werden, dass sich die Streubreiten der komplexen Sichtssituationen innerhalb der Stadt- und Überlandfahrten im Vergleich zur Autobahnsituation signifikant unterscheiden. Die gerichtete Unterschiedshypothese (H10) wird damit bestätigt. Bei der Betrachtung der Einzelkomponenten kann gezeigt werden, dass ein Unterschied in der x- und y-Ausdehnung der Streubreite signifikant nachgewiesen wird. In z-Richtung liegt kein signifikanter Unterschied vor.



Tabelle 4-14: Ergebnisse der t-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H10)

Vergleich	Mittelwert-differenz [mm]	Standardabweichung (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (Cohen's d)
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S10 y – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S02 y	14,64	9,75	< 0,001	1,50
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S10 y – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S06 y	14,03	9,14	< 0,001	1,53
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S10 z – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S02 z	2,40	9,58	0,180	-
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S10 z – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S06 z	1,70	10,32	0,231	-
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S10 3D MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S02 3D	20,16	15,52	< 0,001	1,30
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S10 3D MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S06 3D	20,26	14,83	< 0,001	1,37

Resümierend kann der Einfluss der Sichtsituation (Faktor D) auf die dynamische Augpunktlagenverteilung anhand aller drei Bewertungsmaße nachgewiesen werden. Bei komplexen Sichtsituationen wird häufiger als bei Baseline-Sichtsituationen in den Spiegel geblickt. Während des Linksabbiegens auf eine Vorfahrtstraße (S07) werden von den Probanden durchschnittlich 20mal mehr Spiegelblicke als bei der Geradeausfahrt (S05) durchgeführt.

Die dynamischen Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen liegen in Fahrzeugfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen bei Baseline-Sichtsituationen. Die Mittelwertdifferenz (MWD) liegt für S05-S06 bei 27,34 mm, für S05-S07 bei 28,51 mm und für S05-S08 bei 24,66 mm und damit durchgehend im auslegungsrelevanten Bereich.

Die dynamischen Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen, während der Stadt- oder Überlandfahrt, liegen in Fahrzeugfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen, während der Autobahnfahrt. Die Mittelwertdifferenz (MWD) liegt für S10-S02 bei 37,93 mm und für S10-S06 bei 36,58 mm und damit jeweils im auslegungsrelevanten Bereich.

Die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen ist größer als die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei Baseline-Sichtsituationen. Die Mittelwertdifferenz (MWD) liegt für S05-S06 in x-Richtung bei 16,18 mm und in y-Richtung bei 21,95 mm und damit jeweils mit sehr großen Effektstärken im auslegungsrelevanten Bereich. Es resultiert eine dreidimensionale Mittelwertdifferenz (MWD) für S05-S06 von 31,12 mm. Die Mediandifferenz (MDD) des z-Anteils für S05-S06 ist mit 5,63 mm sehr gering und liegt damit nicht im auslegungsrelevanten Bereich.

Die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen, während der Stadt- oder Überlandfahrt, ist größer als die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen, während der Autobahnfahrt. Die Mediandifferenz (MDD) liegt für S10-S06 in x-Richtung bei 13,74 mm. Die Mediandifferenz (MDD) liegt für S10-S06 in y-Richtung bei 14,03 mm. Damit liegen beide Werte mit sehr großen Effektstärken im beachtenswerten Bereich. Es resultiert eine dreidimensionale Mittelwertdifferenz (MWD) für S05-S06 von 20,26 mm. Die z-Anteile unterscheiden sich nicht signifikant.

Beim Vergleich der mittleren dynamischen Augpunktlagen ist damit ein auslegungsrelevanter Einfluss der Sichtsituation auf die mittlere Position in Fahrzeuglängs- und Fahrzeughochrichtung (x & z) festzustellen. Die Streubreiten der dynamischen Augpunktlagen unterscheiden sich situationsabhängig in Fahrzeuglängs- und Fahrzeugquerrichtung (x & y). Daher ist die Zusammenstellung der anwendungsspezifischen Nutzungsanteile bei der Analyse dynamischer Sichtsituationen von entscheidender Bedeutung. Innerhalb dieser Arbeit wird zur ergonomischen Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) die fernverkehrstypische, in den Kapiteln 3.1.4 und 4.1.1 beschriebene, Zusammenstellung der Sichtsituationsanteile verwendet.

---

### 4.3 Identifikation des Knickwinkels als Prädiktor dynamischen Sichtverhaltens

---

Die automatisierte Regelung der während der dynamischen Sichtsituationen dargestellten Sichtbereiche eines Kamera-Monitor-Systems (KMS) soll über Fahrzeugparameter gesteuert werden (vgl. Kapitel 2.2.5). Insbesondere werden hier die Parameter des Knickwinkels und der Fahrzeuggeschwindigkeit vorgeschlagen (Bothe et al. 2013e S. 9; Huber et al. 2014 S. 13 f.). Daher ist von besonderem Interesse, ob die einzelnen Sichtsituationen durch diese Fahrzustandsparameter differenziert werden können. Es wird zunächst der Zusammenhang zwischen den Sichtsituationen und den jeweiligen Knickwinkelverteilungen genauer betrachtet. Es folgt die Untersuchung der situationsabhängigen Fahrzeuggeschwindigkeitsverteilungen. Um die Anzahl der notwendigen Fahrzeugparameter zu reduzieren ist der Zusammenhang zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und während der realen Nutzung auftretender maximaler Knickwinkel von besonderem Interesse. Da die dynamische Augpunktlage eine wesentliche Kenngröße des dynamischen Sichtverhaltens darstellt, werden zum Abschluss dieses Kapitels die Abhängigkeit der Augpunktlagenverteilungen von der Fahrzeuggeschwindigkeit und dem Knickwinkel betrachtet.

---

#### 4.3.1 Zusammenhang zwischen der Sichtsituation und dem Knickwinkel

---

In Kapitel 1.1.4 und Kapitel 2.3.3 wurde die starke Abhängigkeit des für den Fahrer zur Durchführung der Sichtsituation notwendigen dynamischen Sichtbereichs vom Knickwinkel zwischen Zugmaschine und Auflieger gezeigt (vgl. Bothe et al. 2013b S. 298 ff., Zaindl et al. 2013 S. 3 ff.). Da der Fahrer in komplexen Situationen mit großen Fahrtrichtungsänderungen die Spurhaltung seines Aufliegers überwachen muss, werden die hintere Kante und die Räder des geknickten Anhängers zu Sichtzielen.

In Abbildung 4-29 sind die Knickwinkelverteilungen der geraden Überlandfahrt (S05) und der Kreisverkehrsdurchfahrt (S06) dargestellt. Es sind alle innerhalb dieser Situationen im Versuchsfahrzeug V2 aufgezeichneten Messwerte aufgetragen. Zur Visualisierung der Verteilungsformen ist neben der aufgezeichneten Abfolge aller Versuchspersonen auch eine sortierte Abfolge der auftretenden Knickwinkel abgebildet. Die Medianwerte der beiden unterschiedlich komplexen Sichtsituationen unterscheiden sich praktisch nicht ( $MDD = 0,02^\circ$ ). Die Verteilungen der situationsabhängigen Knickwinkel sind jedoch sehr verschieden.

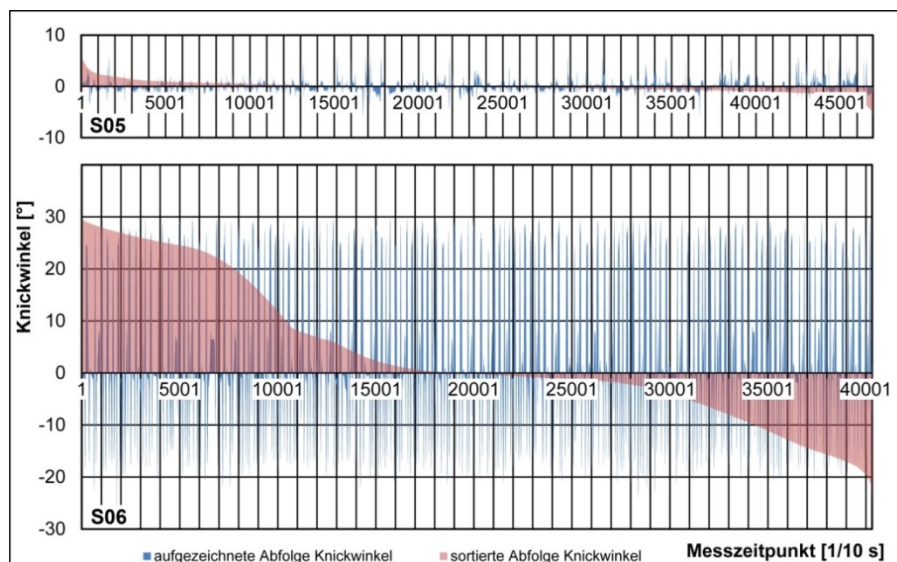


Abbildung 4-29: Knickwinkelverteilung V2 S05 (n = 46.933) und S06 (n = 40.312)

Wie bereits das Beispiel der betrachteten Sichtsituationen S05 und S06 zeigt, ist beim Vergleich der während einer Sichtsituation auftretenden Knickwinkel die alleinige Betrachtung der Mittel- oder Medianwerte nicht sinnvoll. In Abbildung 4-30 sind die Medianwerte der Knickwinkel aller ausgewerteten Sichtsituationen der n = 46 Versuchspersonen im Versuchsfahrzeug V2 dargestellt. Es findet keine personenindividuelle Auswertung statt. Zur Visualisierung der maximal auftretenden

positiven und negativen Knickwinkel ist das P99-Intervall abgebildet. Es beinhaltet alle Werte vom 0,5. bis zum 99,5. Perzentil und gibt somit die um Ausreißer bereinigten Maximalwinkel der jeweiligen Sichtsituationen an. Knickwinkel über  $\pm 10^\circ$  und asymmetrische Verteilungen treten nur bei den komplexen Stadt- und Überlandfahrten auf. Die Baseline-Sichtsituationen S01 und S05 weisen eine symmetrische Verteilung und Knickwinkelbeträge  $< 6^\circ$  auf. Auch bei den Autobahnsituationen S09-S11 sind die auftretenden Knickwinkel symmetrisch verteilt und der Betrag der Maximalwerte ist  $< 2^\circ$ . Die auftretenden Knickwinkel der Stadt- und Landstraßensichtsituationen liegen im Intervall  $\pm 35^\circ$ , die der Autobahnsituationen hingegen im Intervall  $\pm 2^\circ$ .

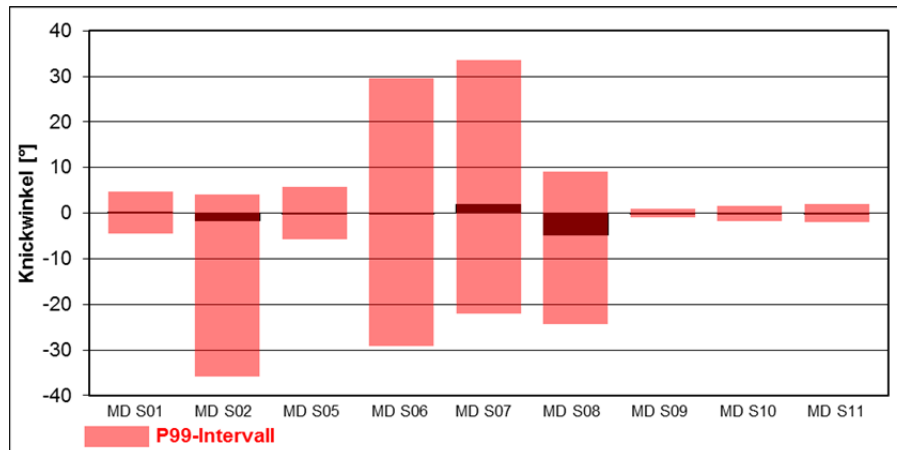


Abbildung 4-30: Zusammenhang zwischen Sichtsituation und Knickwinkel V2 n = 46

Wie die vorgestellte Betrachtung zeigt, sind zur Differenzierung der Sichtsituationen anhand der Knickwinkelverteilung nicht die Medianwerte sondern die maximal auftretenden Knickwinkel heranzuziehen. Daher wurde folgende Hypothese aufgestellt:

**Hypothese 11:** Sichtsituationen lassen sich anhand der maximal auftretenden Knickwinkel differenzieren. (H11)

Zur Untersuchung der Unterschiedshypothese werden wiederum die Überland-Szenarien, bestehend aus der Baseline-Sichtsituation (S05) und den komplexen Sichtsituationen (S06-S08) betrachtet. Zur Reduktion des Untersuchungsumfangs wurde unter der Annahme, dass im realen Straßenverkehr sowohl rechts als auch Linksabbiegemaneöver mit vergleichbaren maximalen Knickwinkeln auftreten, für die weiteren Betrachtungen der Betrag des Knickwinkels herangezogen. Die maximal auftretenden Knickwinkel werden bei den folgenden Betrachtungen durch das vom 90. und 100. Perzentil begrenzte Intervall ( $>P90$ ) der Knickwinkelverteilung repräsentiert.

Die Knickwinkelwerte innerhalb des Intervalls ( $>P90$ ) liegen nicht normalverteilt vor. Daher werden zum Vergleich der Gruppen die Medianwerte der Intervalle verwendet (vgl. Abbildung 4-31). Zur Fehlerindikation werden die Interquartilbereiche dargestellt.

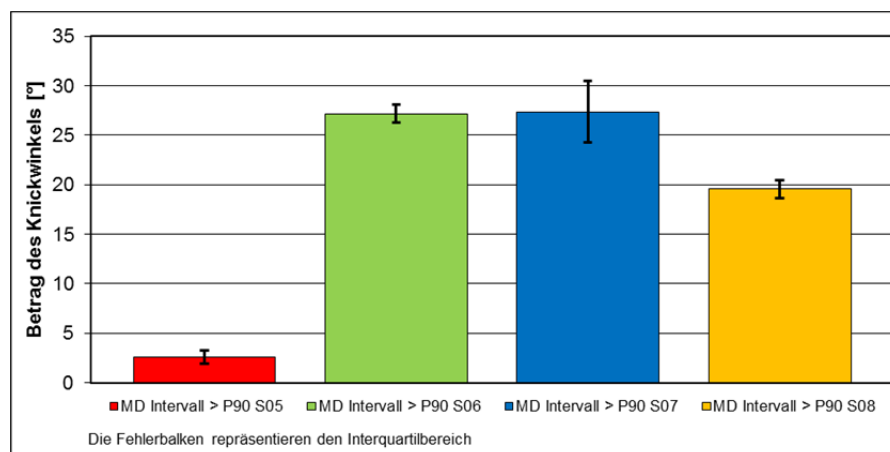


Abbildung 4-31: Differenzierung der Sichtsituationen durch die maximal auftretenden Knickwinkel (Intervall  $> P90$ ) V2 n = 46

Da diese Untersuchung nicht personenindividuell durchgeführt wurde, handelt es sich um nicht verbundene Vergleichsgruppen. Es wird somit der Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 239; Bortz et al. 1990 S. 200; Field 2013 S. 217) eingesetzt. Die Medianwerte der maximal auftretenden Knickwinkel der Situation S06 (STS = 80,64;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,86$ ), der Situation S07 (STS = 77,88;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,86$ ) und der Situation S08 (STS = 81,34;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,86$ ) unterscheiden sich signifikant von den Werten der Situation S05. Die Mediandifferenz (MDD) liegt für S05-S06 bei 24,54°, für S05-S07 bei 24,75° und für S05-S08 bei 16,95° und damit mit großer Effektstärken im auslegungsrelevanten Bereich (vgl. Tabelle 4-15). Die maximal auftretenden Knickwinkel bei komplexen Sichtsituationen (S06, S07) sind 10mal so groß, wie die maximalen Knickwinkel der Baseline-Sichtsituation (S05).

Tabelle 4-15: Ergebnisse der Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H11)

Vergleich	Mediandifferenz [°]	Interquartilbereich (gemittelt) [°]	Signifikanz (zweiseitig)	Effektstärke (r)
MD dyn. Knickwinkel Intervall > P90 S05 – MD dyn. Knickwinkel Intervall > P90 S06	24,54	0,78	< 0,001	0,86
MD dyn. Knickwinkel Intervall > P90 S05 – MD dyn. Knickwinkel Intervall > P90 S07	24,75	1,89	< 0,001	0,86
MD dyn. Knickwinkel Intervall > P90 S05 – MD dyn. Knickwinkel Intervall > P90 S08	16,95	0,78	< 0,001	0,86

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Sichtsituationen über die maximal auftretenden Knickwinkel differenziert werden können. Die Unterschiedshypothese H11 wird daher bestätigt. Knickwinkel über  $\pm 10^\circ$  und asymmetrische Verteilungen treten nur bei den komplexen Stadt- und Überlandfahrten auf. Die Baseline-Sichtsituationen S01 und S05 weisen eine symmetrische Verteilung und Knickwinkelbeträge  $< 6^\circ$  auf. Auch bei den Autobahnsituationen S09-S11 sind die auftretenden Knickwinkel symmetrisch verteilt und der Betrag der Maximalwerte ist  $< 2^\circ$ . Die auftretenden Knickwinkel der Stadt- und Landstraßensichtsituationen liegen im Intervall  $\pm 35^\circ$ , die der Autobahnsituationen im Intervall  $\pm 2^\circ$ .

#### 4.3.2 Zusammenhang zwischen der Sichtsituation und der Geschwindigkeit

Die Sichtsituationen beschreiben schon aufgrund ihrer Fahrstreckenzusammensetzung, von den Abbiegemanövern in der Stadt bis zu den Überholmanövern auf der Autobahn, das gesamte mit einem Nutzfahrzeug abrufbare Fahrzeuggeschwindigkeitsintervall von 0 bis 90 km/h. Daher soll untersucht werden, ob die Sichtsituationen auch über die jeweilige Geschwindigkeitsverteilung separiert werden können. Es wurde folgende Hypothese aufgestellt:

**Hypothese 12:** Sichtsituationen lassen sich anhand ihrer Geschwindigkeitsverteilung differenzieren. (H12)

In Abbildung 4-32 sind die Geschwindigkeitsverteilungen der geraden Überlandfahrt (S05) und der Kreisverkehrsdurchfahrt (S06) dargestellt. Es sind alle innerhalb dieser Situationen im Versuchsfahrzeug V2 aufgezeichneten Messwerte abgebildet. Zur Visualisierung der Verteilungsformen ist neben der aufgezeichneten Abfolge aller Versuchspersonen auch eine sortierte Abfolge der auftretenden Fahrzeuggeschwindigkeiten abgebildet. Die Medianwerte der beiden unterschiedlich komplexen Sichtsituationen unterscheiden sich stark (MDD = 40,62 km/h). Es ist ebenfalls ein Unterschied in der Verteilungsform zu erkennen.

In Abbildung 4-33 sind die Medianwerte der Fahrzeuggeschwindigkeit aller ausgewerteten Sichtsituationen der  $n = 46$  Versuchspersonen im Versuchsfahrzeug V2 dargestellt. Es findet keine personenindividuelle Auswertung statt. Die Geschwindigkeitsverteilungen sind aufgrund der während der Erhebung auftretenden fahrzeug- und fahrstreckenbasierten Limitierungen nicht normalverteilt. Zur Visualisierung der auftretenden Fahrzeuggeschwindigkeiten ist das P99-Intervall der Geschwindigkeitsverteilung abgebildet. Es beinhaltet alle Werte vom 0,5. bis zum 99,5. Perzentil und gibt somit die um Ausreißer bereinigte Gesamtverteilung der Fahrzeuggeschwindigkeiten an.



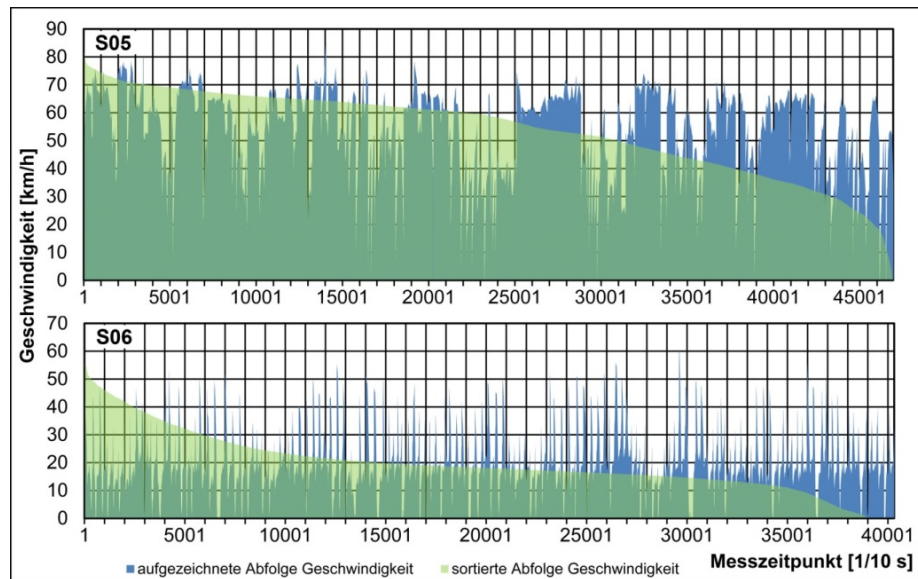


Abbildung 4-32: Geschwindigkeitsverteilung V2 S05 (n = 46.933) und S06 (n = 40.312)

Im Folgenden werden die Überland-Szenarien, bestehend aus der Baseline-Sichtsituation (S05) und den komplexen Sightsituationen (S06-S08) betrachtet. Zur Untersuchung der Unterschiedshypothese H12 wird der Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 239; Bortz et al. 1990 S. 200; Field 2013 S. 217) eingesetzt. Die Medianwerte der Fahrzeuggeschwindigkeiten der Situation S06 (STS = 232,65;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,78$ ), der Situation S07 (STS = 234,77;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,81$ ) und der Situation S08 (STS = 136,75;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,46$ ) unterscheiden sich signifikant von den Werten der Situation S05. Die Mediandifferenz (MDD) liegt für S05-S06 bei 40,62 km/h, für S05-S07 bei 50,73 km/h und für S05-S08 bei 29,39 km/h und damit mit mittlerer bis großer Effektstärke im auslegungsrelevanten Bereich (vgl. Tabelle 4-16). Die mittlere Geschwindigkeit der Baseline-Sichtsituation (S05) ist damit über 5mal größer als die mittlere Geschwindigkeit der komplexen Sightsituation (S07). Mittlere Geschwindigkeiten von über 30 km/h treten nur bei Baseline- oder Autobahnsichtsituationen auf.

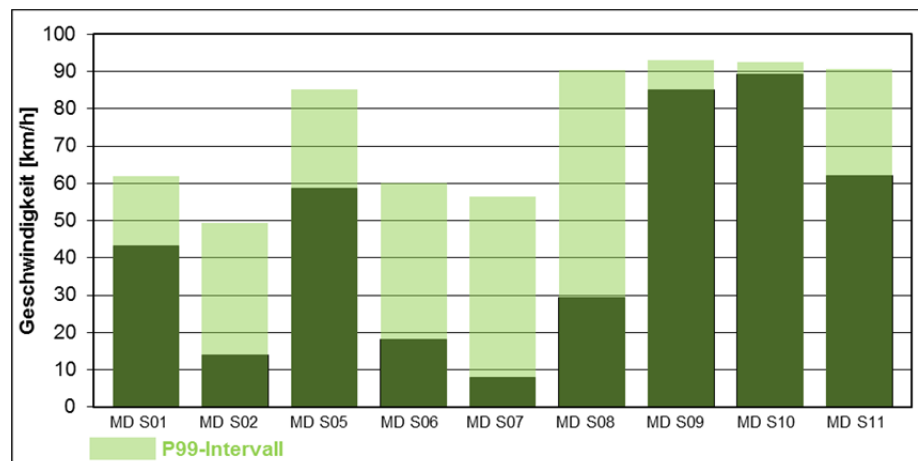


Abbildung 4-33: Zusammenhang zwischen Sightsituation und Geschwindigkeit V2 N = 46

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Sightsituationen über die mittlere Geschwindigkeit differenziert werden können. Die Unterschiedshypothese H12 wird daher bestätigt. Mittlere Geschwindigkeiten von über 30 km/h treten nur bei Baseline- oder Autobahnsichtsituationen auf. Die Geschwindigkeitsverteilungen sind aufgrund der während der Erhebung auftretenden fahrzeug- und fahrstreckenbasierten Limitierungen nicht normalverteilt. So treten in der Stadt maximale Geschwindigkeiten von 60 km/h auf, bei den Autobahnsituationen liegt das Limit bei 90 km/h. Der Medianwert während des Überholvorgangs liegt bei 89,31 km/h. Der Abstand zwischen Medianwert und Maximalwert ist bei den Autobahnsituationen aufgrund der niedrigen Komplexität geringer als bei den Stadt- und Überlandfahrten.

Tabelle 4-16: Ergebnisse der Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H12)

Vergleich	Mediandifferenz [km/h]	Interquartilbereich (gemittelt) [km/h]	Signifikanz (zweiseitig)	Effektstärke (r)
MD dyn. Knickwinkel S05 – MD dyn. Knickwinkel S06	40,62	15,38	< 0,001	0,78
MD dyn. Knickwinkel S05 – MD dyn. Knickwinkel S07	50,73	20,66	< 0,001	0,81
MD dyn. Knickwinkel S05 – MD dyn. Knickwinkel S08	29,39	22,05	< 0,001	0,46

#### 4.3.3 Zusammenhang zwischen dem Knickwinkel und der Geschwindigkeit

Um das mentale Modell (vgl. Hakuli et al. 2012 S. 641), das sich der Fahrer vom Systemverhalten eines KMS aufbaut so einfach wie möglich zu halten, soll die Anzahl der Systemparameter zur Steuerung des Verschiebealgorithmus auf ein Minimum begrenzt werden. Dazu wird der Zusammenhang zwischen dem Knickwinkel und der Fahrzeuggeschwindigkeit während des realen Nutzungsverhaltens untersucht.

In Abbildung 4-34 sind alle auswertbaren Knickwinkel ( $n = 624.120$ ) des Versuchsfahrzeugs V2 über der Fahrzeuggeschwindigkeit aufgetragen. Es werden die Sichtsituationen S01-S02 und S05-S11 in der in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Zusammensetzung berücksichtigt. Damit repräsentiert diese Knickwinkelverteilung das reale Nutzungsverhalten im Fernverkehr. Die Rangier-Sichtsituationen sind aus Gründen der Datenverfügbarkeit in der Auswertung nicht berücksichtigt. Bereits in dieser Darstellung sind durch das reale Nutzungsverhalten begründbare geschwindigkeitsabhängige Grenzen der Knickwinkelverteilung zu erkennen. Im Geschwindigkeitsbereich zwischen 10 und 25 km/h werden die maximal auftretenden Knickwinkel, die in den Situationen des Rechts- (S02) und Linksabbiegens (S07) auftreten, durch die Fahrspurbegrenzungen auf  $\pm 35^\circ$  beschränkt. Im Geschwindigkeitsbereich zwischen 40 und 60 km/h, der durch die Medianwerte der Geradeausfahrt in der Stadt (S01) und auf der Landstraße (S05) definiert wird, treten Knickwinkel von  $\pm 10^\circ$  auf. Die Autobahnsituationen (S09-S11), die einen Medianwert der Geschwindigkeit von  $> 60$  km/h aufweisen limitieren die auftretenden Knickwinkel auf  $\pm 5^\circ$ .

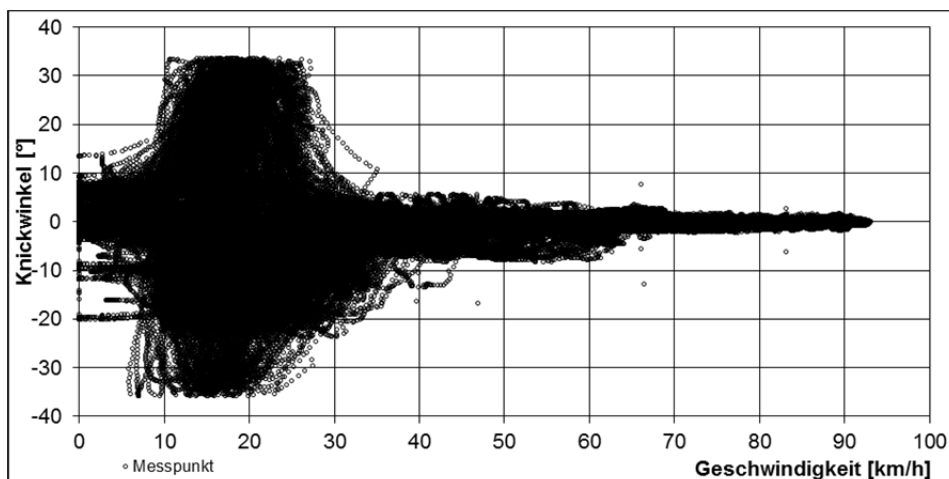


Abbildung 4-34: Knickwinkel über Geschwindigkeit V2  $n = 624.120$

Wie bereits bei der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Sichtsituation und Knickwinkel festgestellt wurde, ist eine Medianwertbetrachtung des Knickwinkels nicht sinnvoll. Aufgrund des nahezu symmetrischen Aufbaus der Knickwinkelverteilung in Abbildung 4-34 liegen die Medianwerte jedes Geschwindigkeitsintervalls im Knickwinkelbereich von  $\pm 1^\circ$ . Es ist vielmehr der maximal auftretende Knickwinkel je Geschwindigkeitsintervall von Interesse. Zu Untersuchung des Zusammenhangs zwischen maximal auftretenden Knickwinkeln und der Fahrzeuggeschwindigkeit wurde daher folgende Zusammenhangshypothese aufgestellt:

### Hypothese 13:

Bei der Nutzung von Fernverkehrsfahrzeugen im realen Straßenverkehr kann ein Zusammenhang zwischen den maximal auftretenden Knickwinkeln und der Geschwindigkeit festgestellt werden. (H13)

Aufgrund der nahezu symmetrischen Verteilungsform des aufgezeichneten Knickwinkels wird für die weiteren Betrachtungen der Knickwinkelbetrag herangezogen. Zur Untersuchung der Zusammenhangshypothese (H13) wird der Geschwindigkeitsbereich in Intervalle mit einer Breite von 10 km/h eingeteilt (vgl. Abbildung 4-35). Für jedes Geschwindigkeitsintervall wird der Medianwert des Grenzperzentilbereichs ( $>P90$ ) gebildet. Dieses Vorgehen ist konsistent zu der in Kapitel 4.3.1 verwendeten Methode zur Beschreibung der maximal auftretenden Knickwinkel. In Abbildung 4-35 sind die Medianwerte (MD) des Knickwinkels (KW) der zehn definierten Geschwindigkeitsintervalle dargestellt.

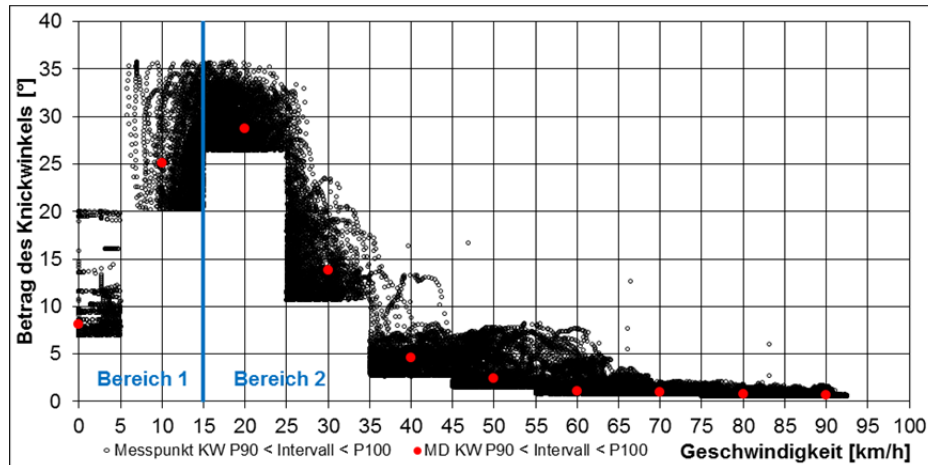


Abbildung 4-35: Medianwerte der Grenzperzentile ( $>P90$ ) des Knickwinkels V2  $n = 62.411$

Der Zusammenhang zwischen dem Betrag der maximal auftretenden Knickwinkel und der Fahrzeuggeschwindigkeit soll mit Hilfe eines Korrelationskoeffizienten beschrieben werden. Dazu wird der Geschwindigkeitsbereich in zwei einzeln auszuwertende Teilbereiche aufgeteilt. Aufgrund der Perzentilbetrachtung liegen die Daten nicht normalverteilt vor. Auch die Anzahl der Messpunkte innerhalb des jeweiligen Geschwindigkeitsintervalls variiert, da die hohen Geschwindigkeitsniveaus fernverkehrstypisch überwiegen. Aus diesen Gründen wurde zur Untersuchung der Zusammenhangshypothese H13 das Spearman-Rangkorrelations-Verfahren (vgl. Spearman 1910 S. 271 ff.; Marascuilo & Serlin 1968 S. 328; Siegel & Castellan 1988 S. 235; Bortz et al. 1990 S. 414; Field 2013 S. 276) ausgewählt. Für den Bereich 1 (0 bis 15 km/h) wird ein positiver ( $n = 5599$ ;  $p < 0,001$ ;  $r_{sp} = 0,793$ ;  $R^2 = 0,629$ ) für den Bereich 2 (15 bis 90 km/h) ein negativer Korrelationskoeffizient ( $n = 56812$ ;  $p < 0,001$ ;  $r_{sp} = -0,875$ ;  $R^2 = 0,766$ ) berechnet. In beiden Bereichen liegt somit ein signifikanter Zusammenhang zwischen den maximal auftretenden Knickwinkeln und der Fahrzeuggeschwindigkeit vor. Die Zusammenhangshypothese H13 wird bestätigt.

#### 4.3.4 Geschwindigkeitsabhängigkeit der dynamischen Augpunktlagen

In Hypothese 8 wurde vermutet, dass bei komplexen Sichtsituationen die mittlere dynamische Augpunktlage im Vergleich zur Position bei Baseline-Sichtsituationen in Fahrtrichtung weiter vorne liegt. Komplexe Fahrsituationen mit großen Fahrtrichtungsänderungen können nur bei niedrigen Geschwindigkeiten durchgeführt werden. Daher wurde folgende Hypothese aufgestellt:

### Hypothese 14:

Die dynamischen Augpunktlagen bei niedrigen Geschwindigkeiten liegen in Fahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen bei hohen Geschwindigkeiten. (H14)

Zur Untersuchung der gerichteten Unterschiedshypothese H14 wird der genutzte Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 90 km/h in vier anwendungsorientierte Teilgruppen aufgeteilt. Mit dem ersten Bereich von 0 bis 10 km/h werden der Fahrzeugstillstand und das unmittelbare Anfahrmanöver berücksichtigt. Im zweiten Geschwindigkeitsbereich von 10 bis 30 km/h treten die maximalen Knickwinkel auf (vgl. Abbildung 4-34). Die dritte Gruppe beinhaltet die Geschwindigkeiten von 30 bis 60 km/h, sie kann als Übergangsbereich zwischen komplexen und Baseline-Sichtsituationen

betrachtet werden. Innerhalb der letzten Gruppe der Fahrzeuggeschwindigkeit, die sich von 60 bis 90 km/h erstreckt, tritt die geringste Knickwinkelvariation auf. Die Daten der Einzelgruppen liegen nicht normalverteilt vor. Deshalb werden zum Vergleich die Medianwerte der Teilgruppen herangezogen. In Abbildung 4-36 sind die x- und z-Koordinaten der Medianwerte durch die Seitenansicht dargestellt. Die y-Koordinaten werden in der Draufsicht in Abbildung 4-37 visualisiert. Zur Fehlerindikation sind die Interquartilbereiche abgebildet.

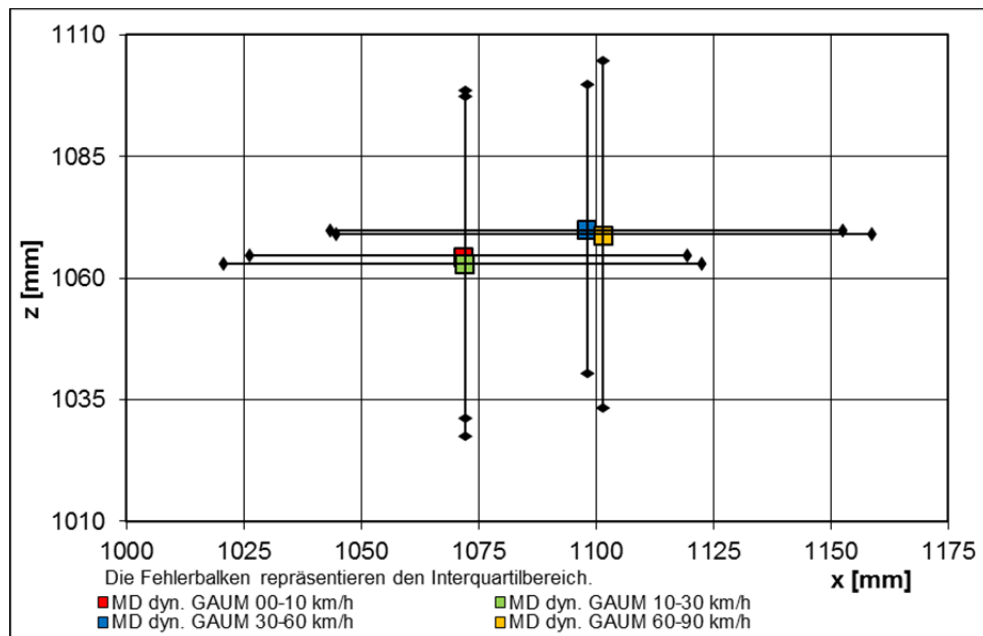


Abbildung 4-36: Einfluss der Geschwindigkeit auf dyn. Augpunktlagen V2 n = 46 Seitenansicht

Zur Untersuchung der Unterschiedshypothese H12 wird die dynamische Augpunktlagenverteilung der Teilgruppe 2 (10 bis 30 km/h) mit der Teilgruppe 4 (60 bis 90 km/h) verglichen. Dadurch wird die größte Spanne der Geschwindigkeiten bei bewegtem Fahrzeug berücksichtigt. Zum Teilgruppenvergleich wird der Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 239; Bortz et al. 1990 S. 200; Field 2013 S. 217) eingesetzt. Die dynamischen Augpunktlagenverteilungen der beiden Teilgruppen unterscheiden sich signifikant (STS = 87,08;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,15$ ) voneinander. Aufgrund der großen Mediandifferenz von 29,55 mm ist dieses Ergebnis trotz der geringen Effektstärke auslegungsrelevant.

Tabelle 4-17: Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H14)

Vergleich	Mediandifferenz [mm]	Interquartilbereich (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (r)
MD dyn. GAUM 10-30 km/h x – MD dyn. GAUM 60-90 km/h x	29,55	108,01	< 0,001	0,15

Durch den Vergleich der beiden Teilgruppen kann eine Abhängigkeit der dynamischen Augpunktlage von der Fahrzeuggeschwindigkeit nachgewiesen werden. Die mittleren Augpunktlagen liegen bei niedrigen Geschwindigkeiten in Fahrzeughängsrichtung weiter vorne als bei hohen Geschwindigkeiten. Die gerichtete Unterschiedshypothese H14 wird damit angenommen.

Nach der Betrachtung der in Abbildung 4-37 visualisierten y-Komponenten der Medianwerte der vier Geschwindigkeitsgruppen wird ein Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit auf die y-Koordinate der dynamischen Augpunktlagenverteilung vermutet. Daher wird dieser Zusammenhang explorativ untersucht. Es wird wiederum die dynamische Augpunktlagenverteilung der Teilgruppe 2 (10 bis 30 km/h) mit der Teilgruppe 4 (60 bis 90 km/h) verglichen. Zum Teilgruppenvergleich wird der Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 239; Bortz et al. 1990 S. 200; Field 2013 S. 217) eingesetzt. Die dynamischen Augpunktlagenverteilungen der beiden Teilgruppen unterscheiden sich signifikant (STS = 79,66;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,14$ ) voneinander. Aufgrund der Mediandifferenz von 16,22 mm ist dieses Ergebnis trotz der geringen Effektstärke beachtenswert.



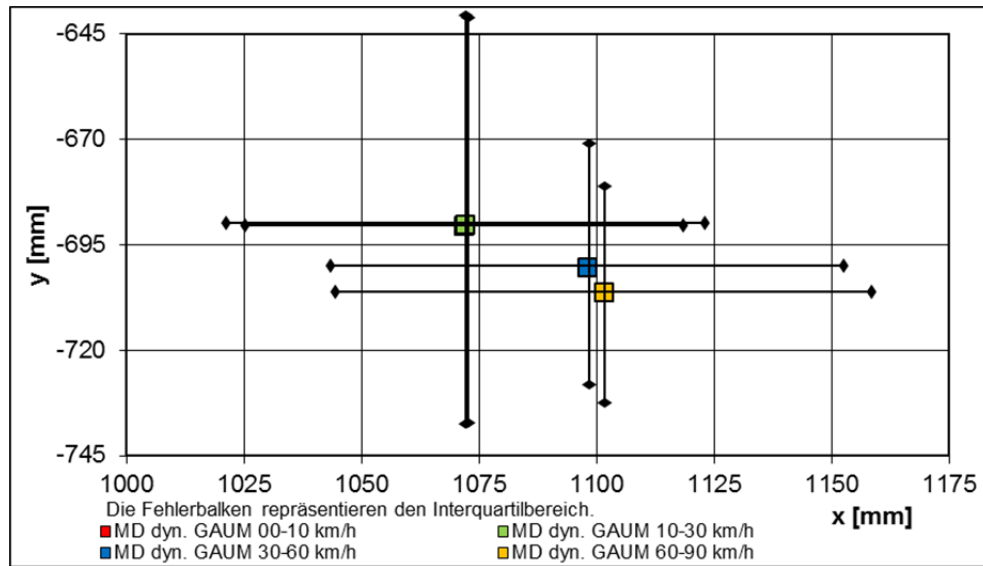


Abbildung 4-37: Einfluss der Geschwindigkeit auf dyn. Augpunktlagen V2 n = 46 Draufsicht

Tabelle 4-18: Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige zur Abhängigkeit der y-Position der dynamischen Augpunktlage von der Fahrzeuggeschwindigkeit

Vergleich	Mediandifferenz [mm]	Interquartilbereich (gemittelt) [mm]	Signifikanz (zweiseitig)	Effektstärke (r)
MD dyn. GAUM 10-30 km/h y – MD dyn. GAUM 60-90 km/h y	16,22	49,79	< 0,001	0,14

Es liegt neben der in Fahrzeuglängsrichtung orientierten Abhängigkeit der Augpunktlage von der Geschwindigkeit auch ein Einfluss auf die Position in Fahrzeugquerrichtung vor. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der dynamischen Augpunktlagenverteilung ist aufgrund der Mediandifferenz von 29,55 mm in x-Richtung und 16,22 mm in y-Richtung bei der ergonomischen Auslegung von Anzeige- und Sichtsystemen zu beachten.

#### 4.3.5 Knickwinkelabhängigkeit der dynamischen Augpunktlagen

Zaindl (2014 S. 2) berichtet von ausgeprägten Kompensationsbewegungen der Augpunktlage in Fahrzeuglängsrichtung zur Verfolgung der hinteren Aufliegerkante bei großen Knickwinkeln. Diese Bewegungsrichtung ist nachvollziehbar, da sie durch den Bewegungsapparat des Menschen ermöglicht wird und die Bewegungsbahn in Fahrzeuglängsrichtung nicht durch Fahrzeugkomponenten eingeschränkt ist. In Fahrzeugquerrichtung wird der Bewegungsraum durch die Seitenscheibe begrenzt. Eine Kopfbewegung in Fahrzeughochrichtung hat keinen positiven Effekt auf die vom Fahrer initiierte Kopfbewegung zur Anpassung der im Spiegel dargestellten Sichtbereiche bei großen Knickwinkeln (vgl. Kapitel 2.3.3). Daher wird die gezielte Kopfbewegung in x-Richtung betrachtet und es wurde folgende gerichtete Unterschiedshypothese formuliert.

**Hypothese 15:** Die dynamischen Augpunktlagen bei großen Knickwinkeln liegen in Fahrzeugfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen bei kleinen Knickwinkeln. (H15)

Innerhalb dieser Untersuchung soll nicht nur der Betrag des Knickwinkels (KW) sondern der positive und negative Nutzungsbereich betrachtet werden. Daher wird der Knickwinkelbereich in vier Intervalle, die unterschiedliche Intensitäten von Rechtskurven beschreiben, ein Intervall, das die Geradeausfahrt repräsentiert und vier Intervalle zur Darstellung von Linkskurven unterteilt (vgl. Abbildung 4-38). Die Werte innerhalb der definierten neun Teilgruppen sind nicht normalverteilt. Daher werden die Medianwerte zur Beschreibung der Gruppen herangezogen. Im folgenden Test sollen die beiden Extremwertgruppen E1 (KW<sub>-40°</sub>\_<sub>-20°</sub>) und E2 (KW<sub>20°</sub>\_<sub>40°</sub>) mit der Referenzgruppe für die Geradeausfahrt R (KW<sub>-1,25°</sub>\_<sub>1,25°</sub>) verglichen werden.

Zur Untersuchung der gerichteten Unterschiedshypothese H15 wird der Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 239; Bortz et al. 1990 S. 200; Field 2013 S. 217) eingesetzt. Die Medianwerte der Augpunktlagenverteilungen der Gruppen E1 (STS = 40,40;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,06$ ) und E2 (STS = 49,47;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,06$ ) unterscheiden sich signifikant von den Werten der Referenzgruppe R. Die Mediandifferenz (MDD) liegt für R-E1 bei 55,57 mm und für R-E2 bei 46,39 mm und damit trotz der niedrigen Effektstärken im auslegungsrelevanten Bereich (vgl. Tabelle 4-19).

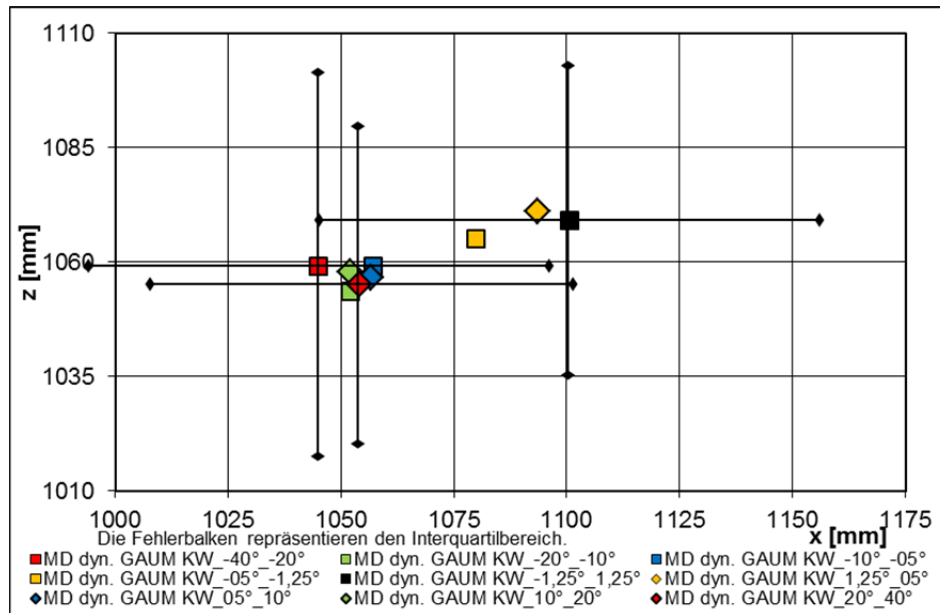


Abbildung 4-38: Einfluss des Knickwinkels auf dyn. Augpunktlagen V2 n = 46 Seitenansicht

Tabelle 4-19: Ergebnisse der Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H15)

Vergleich	Mediandifferenz [mm]	Interquartilbereich (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (r)
MD dyn. GAUM KW $-40^{\circ}$ $-20^{\circ}$ x – MD dyn. GAUM KW $-1,25^{\circ}$ $1,25^{\circ}$ x	55,57	106,35	$< 0,001$	0,06
MD dyn. GAUM KW $20^{\circ}$ $40^{\circ}$ x – MD dyn. GAUM KW $-1,25^{\circ}$ $1,25^{\circ}$ x	46,39	102,13	$< 0,001$	0,08

Durch die Untersuchung kann die Abhängigkeit der dynamischen Augpunktlagenposition in Fahrzeuginnenraumrichtung vom Knickwinkelbereich nachgewiesen werden. Die gerichtete Unterschiedshypothese H15 wird damit bestätigt. Aufgrund der großen Mediandifferenzen von 55,57 mm für R-E1 und 46,39 mm für R-E2 ist dieser Effekt bei der ergonomischen Auslegung von sichtrelevanten Fahrzeugkomponenten zu beachten.

In Abbildung 4-39 sind die y-Komponenten der knickwinkelabhängigen Augpunktlagenverteilungen dargestellt. Aufgrund der erheblichen Mediandifferenz zwischen den beiden Extremgruppen und der Referenzgruppe wird eine Knickwinkelabhängigkeit der y-Komponente der dynamischen Augpunktlage vermutet. Dieser Zusammenhang wird im Folgenden explorativ untersucht. Es wird ebenfalls der Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben (vgl. Marascuilo & Serlin 1968 S. 239; Bortz et al. 1990 S. 200; Field 2013 S. 217) eingesetzt. Die Medianwerte der Augpunktlagenverteilungen der Gruppen E1 (STS = 57,98;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,09$ ) und E2 (STS = 31,97;  $p < 0,001$ ;  $r = 0,06$ ) unterscheiden sich signifikant von den Werten der Referenzgruppe R. Die Mediandifferenz (MDD) liegt für R-E1 bei 65,43 mm und für R-E2 bei 17,02 mm und damit trotz der niedrigen Effektstärken im auslegungsrelevanten Bereich (vgl. Tabelle 4-20). In Bezug auf die Mittellage wird die Augpunktlage bei Rechtskurven (KW negativ) nach rechts verschoben, bei Linkskurven (KW positiv) hingegen nach links. Ob diese Augpunktlagenverschiebung in Fahrzeuginnenraumrichtung primär auf die Sichtinteraktion zurückzuführen ist oder der Fahrdynamik geschuldet ist, kann mit dieser Untersuchung nicht beantwortet werden.

Bei großen positiven Knickwinkeln wird die Augpunktlage nicht so weit von der Mittellage verschoben wie bei großen negativen Knickwinkeln. Dieser Zusammenhang ist plausibel, da der Bewegungsraum des Kopfes auf der linken Seite durch die Seitenscheibe begrenzt wird. In Richtung Fahrzeugmitte liegt hingegen keine Einschränkung der Kopfbewegung vor.

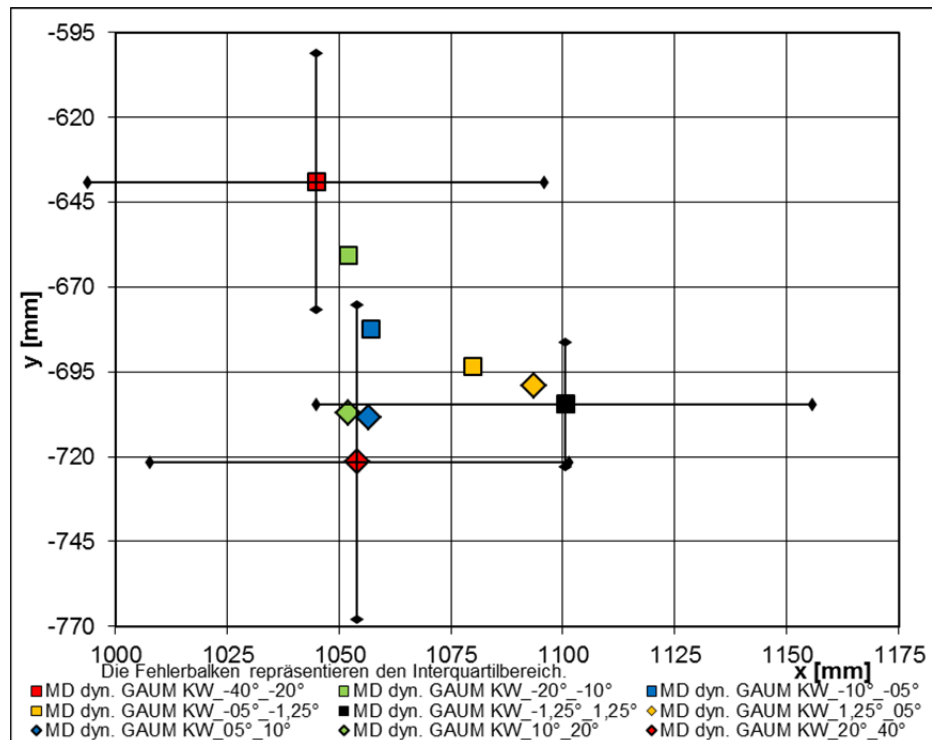


Abbildung 4-39: Einfluss des Knickwinkels auf dyn. Augpunktlagen V2 n = 46 Draufsicht

Tabelle 4-20: Ergebnisse der Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige zur Abhängigkeit der y-Position der dynamischen Augpunktlage von der Fahrzeuggeschwindigkeit

Vergleich	Mediandifferenz [mm]	Interquartilbereich (gemittelt) [mm]	Signifikanz (zweiseitig)	Effektstärke (r)
MD dyn. GAUM KW_-40°_-20° y – MD dyn. GAUM KW_-1,25°_1,25° y	65,43	55,72	< 0,001	0,09
MD dyn. GAUM KW_20°_40° y – MD dyn. GAUM KW_-1,25°_1,25° y	17,02	59,76	< 0,001	0,06

Resümierend kann festgestellt werden, dass ein Einfluss des Knickwinkels sowohl auf die x- als auch auf die y-Komponente der dynamischen Augpunktlagen signifikant nachgewiesen werden kann. Interessant ist die asymmetrische Auswirkung auf die Augpunktlage in Fahrzeugquerrichtung. Die gefundenen Zusammenhänge sind bei der ergonomischen Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) zu berücksichtigen.

Da mit dem Knickwinkel die beiden Fälle der Links- und Rechtskurve unterschieden werden können besitzt dieser Parameter im Vergleich zur Fahrzeuggeschwindigkeit eine höhere Aussagekraft. Bei der alleinigen Betrachtung des Einflusses der Fahrzeuggeschwindigkeit kann ausschließlich eine Augpunktlagenverschiebung bei niedrigen Geschwindigkeiten zur Fahrzeugmitte hin nachgewiesen werden. Die Betrachtung der positiven und negativen Knickwinkel liefert bei der Analyse der dynamischen Augpunktlage in Fahrzeugquerrichtung mehr Informationsgehalt. So findet bei Linkskurven eine Augpunktlagenverschiebung nach links statt. Der Betrag dieser Verschiebung ist jedoch kleiner als der Betrag der rechtsseitigen Verschiebung der dynamischen Augpunktlagen bei Rechtskurven. In der folgenden Analyse werden die dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht daher auf den Knickwinkel und nicht auf die Fahrzeuggeschwindigkeit bezogen. Bei der Umsetzung von Verschiebekennlinien für die automatisierte Anpassung des dargestellten Sichtbereichs eines KMS ist ebenfalls die Verwendung des Knickwinkels der Fahrzeuggeschwindigkeit vorzuziehen. Der Knickwinkel wird somit als Prädiktor für das dynamischen Sichtverhalten identifiziert.

## 4.4 Analyse dynamischer Sichtbereiche der indirekten Sicht

Zur ergonomischen Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) sind Erkenntnisse über die durch Fahrzeugparameter prädiktierbaren dynamischen Sichtbereiche notwendig. Der vom Fahrer innerhalb des Versuchs genutzte Sichtbereich der indirekten Sicht kann mit Hilfe des Modells zur Sichtbereichsberechnung für jeden Sichtdatensatz bestimmt werden. Um sicherzustellen, dass die ermittelten Sichtbereiche den vom Fahrer situationsabhängig benötigten Sichtbereichen entsprechen, wurde begleitend zur Augpunktlagenmessung eine subjektive Bewertung des Spiegelsystems durchgeführt. Die Auswertung dieser subjektiven Beurteilung der verfügbaren Sichtbereiche wird der Analyse der dynamischen Sichtbereiche vorangestellt. Es folgt die Untersuchung des Einflusses der Sichtsituationen, der Fahrzeugvarianten und der Körperhöhen auf die vom Fahrer genutzten dynamischen Bereiche der indirekten Sicht.

### 4.4.1 Subjektive Bewertung der verfügbaren Sichtbereiche

Die subjektiven Bewertungen der Interaktion des Fahrers mit dem vermessenen Spiegelsystem wurden nach Absolvierung der einzelnen Fahrstreckenabschnitte und resümierend nach Versuchsabschluss durchgeführt (vgl. Kapitel 3.3). Zur Bewertung wurde eine Skala mit sechs Stufen von „sehr gut“ bis „sehr schlecht“ eingesetzt. Die ausgewerteten Antworten aller Probanden auf die Frage: „Wie gut können Sie die Sichtbereiche außerhalb des Fahrzeugs über die Spiegel einsehen?“ (vgl. Kapitel 3.2.5) sind in Abbildung 4-40 zusammengefasst.

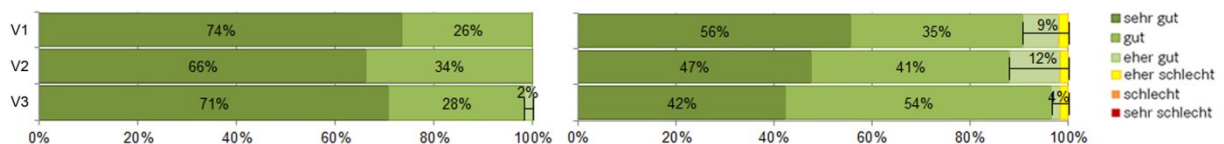


Abbildung 4-40: Bewertung der verfügbaren Sichtbereiche nach der Autobahnfahrt (links) und nach Versuchsabschluss (rechts) N = 152

Nach der Autobahnfahrt wurde die Verfügbarkeit der benötigten Sichtbereiche in allen Fahrzeugen mit „gut“ bis „sehr gut“ bewertet. Auch bei der Bewertung nach Ende des Versuchs werden die verfügbaren Sichtbereiche von den meisten Probanden als überdurchschnittlich beurteilt. 2% der Versuchsteilnehmer jedes Fahrzeugs bewerteten die Sichtbereiche resümierend als eher schlecht.

In Abbildung 4-41 sind die mittleren subjektiven Bewertungen zum Thema der direkten und indirekten Sicht während des Versuchs dargestellt. Die Beurteilung der Sichtbereichsverfügbarkeit für Rangier-, Überland- und Autobahnfahrt unterscheiden sich signifikant voneinander. Die Rangiersituationen liefern im Vergleich zur Abschlussbefragung schlechtere Bewertungen. Nach der Überlandfahrt werden die verfügbaren Sichtbereiche gleich gut und für die Autobahnfahrt besser als in der Befragung nach Versuchsabschluss bewertet. Nach jedem Fahrstreckenanteil wird im Mittel eine gute bis sehr gute Bewertung abgegeben.

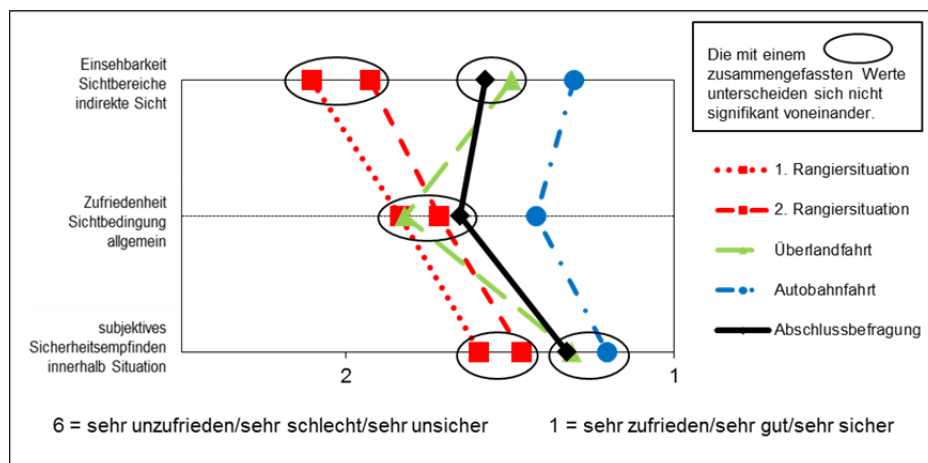


Abbildung 4-41: Subjektive Bewertung der Sichtbereiche innerhalb der Fahraufgabe N = 152



Die Analyse der subjektiven Bewertung zur Verfügbarkeit der Sichtbereiche zeigt, dass das konventionelle Spiegelsystem in keiner der ausgewerteten Sichtsituationen zur Einschränkung der indirekten Sicht führt. Damit werden die aufgezeichneten Sichtbereiche der indirekten Sicht als zur Durchführung der jeweiligen Sichtaufgabe vom Fahrer benötigte Bereiche angesehen.

#### 4.4.2 Einfluss der Sichtsituation (Faktor D)

Zur Bestimmung der dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht werden die Sichtdatensätze mit dem in Kapitel 4.1.5 beschriebenen Modell zur Sichtbereichsberechnung ausgewertet. Der Knickwinkel wurde als Prädiktor für das dynamischen Sichtverhalten identifiziert. Daher werden die Sichtbereiche für jede Sichtsituation über den genutzten Knickwinkelbereich bestimmt. Zur Beschreibung der Lage und Ausdehnung der Sichtbereiche relativ zur Kameraposition eines KMS werden die Sichtbereichswinkel (FOV-Winkel) eingesetzt (vgl. Abbildung 4-42). Je Kameraposition werden zwei horizontale und zwei vertikale FOV-Winkel definiert. Die horizontalen Sichtbereichswinkel beschreiben die Breite des dynamischen Sichtbereichs.

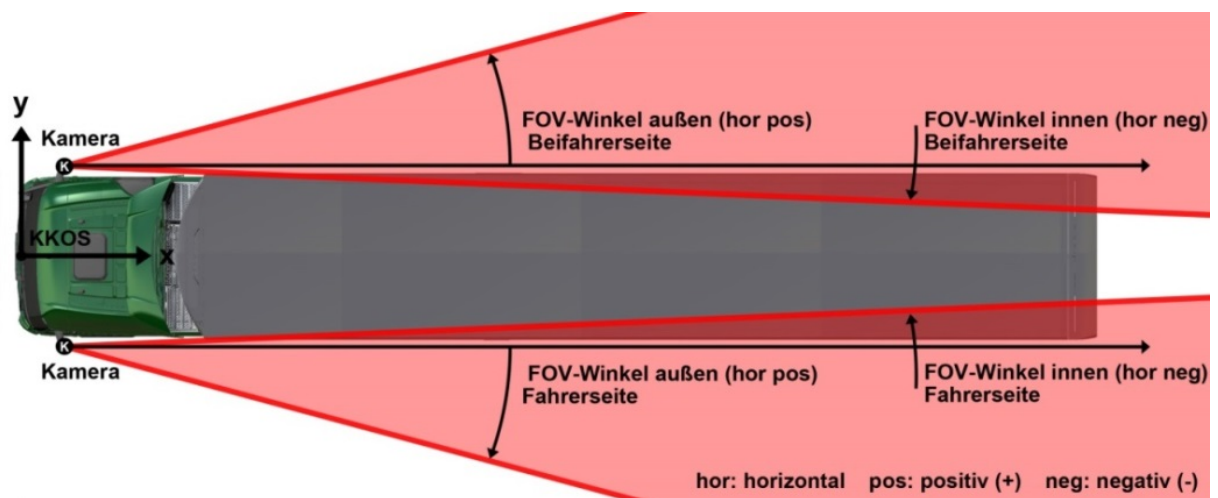


Abbildung 4-42: Definition der horizontalen Sichtbereichswinkel (FOV-Winkel) zur Darstellung des dynamischen Sichtbereichs

Die Breite des Knickwinkelbereiches gibt an während welchen Knickwinkeln der Spiegel genutzt wird. Da bereits die Verteilung aller durchfahrenen Knickwinkel situationsabhängig ist, wird vermutet, dass die Sichtsituation auch einen Einfluss auf die Breite des für Spiegelblicke genutzten Knickwinkelbereiches hat. Daher wurde die folgende Unterschiedshypothese definiert:

**Hypothese 16:** Die dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht, verschiedener Sichtsituationen, unterscheiden sich durch die Breite des genutzten Knickwinkelbereiches. (H16)

In Abbildung 4-43 sind die genutzten Knickwinkelbereiche der Sicht über den fahrerseitigen Hauptspiegel (HSL) während der Landstraßen-Sichtsituationen (S05-S08) dargestellt. Es unterscheiden sich die Breiten der genutzten Knickwinkelbereiche. Die Breite des KW-Bereichs während der Kreisverkehrsdurchfahrt (S06) beträgt ca. 40°, während er Geradeausfahrt (S05) nur ca. 3°. Die Hypothese H16 wird damit bestätigt. Die Breite des genutzten Knickwinkelbereichs hängt mit der in Kapitel 4.3.1 nachgewiesenen Abhängigkeit der maximal auftretenden Knickwinkel von den Sichtsituationen zusammen. Hierbei werden jedoch ausschließlich Knickwinkelbereiche bei denen in den entsprechenden Spiegel geblickt wird ausgewertet.

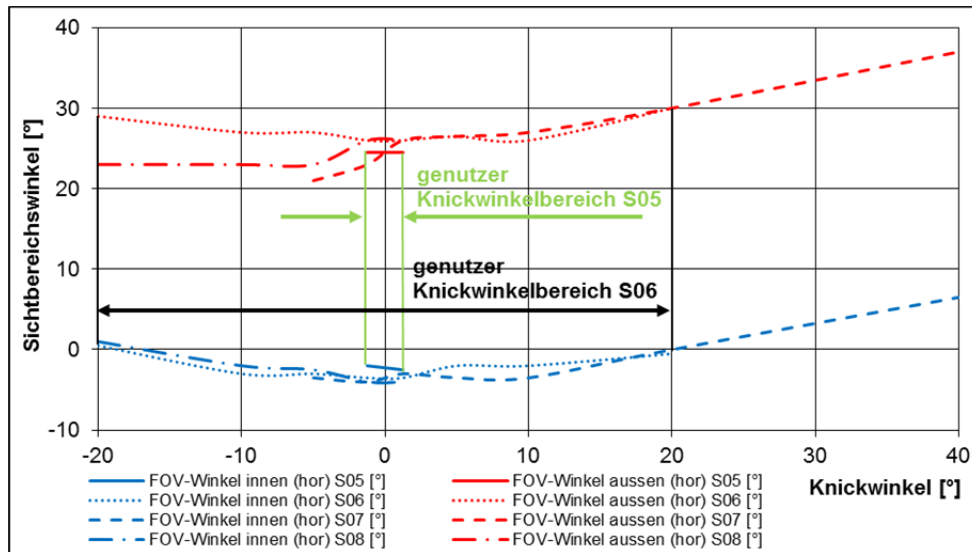


Abbildung 4-43: Genutzte Knickwinkelbereiche der Landstraßen-Sichtsituationen V2 HSL

Der genutzte Sichtbereich, der durch den inneren und äußeren FOV-Winkel begrenzt wird, kann für jede Abstufung des genutzten Knickwinkelbereichs bestimmt werden (vgl. Abbildung 4-44). Somit wird ein Verlauf des dynamischen Sichtbereichs über dem Knickwinkel repräsentiert. In Kapitel 1.1.4 und Kapitel 2.3.3 wurde die starke Abhängigkeit des für den Fahrer zur Durchführung der Sichtsituation notwendigen dynamischen Sichtbereichs vom Knickwinkel zwischen Zugmaschine und Auflieger gezeigt (vgl. Bothe et al. 2013b S. 298 ff., Zaindl et al. 2013 S. 3 ff.). Da der Fahrer in komplexen Situationen mit großen Fahrtrichtungsänderungen die Spurhaltung seines Aufliegers überwachen muss, werden die hintere Kante und die Räder des geknickten Anhängers zu Sichtzielen der indirekten Sicht. Es wurde beobachtet, dass der Fahrer in diesen Situationen durch gezielte Kopfbewegungen den im Spiegel dargestellten Sichtbereich dynamisch diesen Sichtzielen anpasst. Daher wurde angenommen, dass der Sichtbereichsverlauf situationsabhängig ist:

**Hypothese 17:** Der Verlauf dynamischer Sichtbereiche der indirekten Sicht verschiedener Sichtsituationen unterscheidet sich. (H17)

Die Verläufe der dynamischen Sichtbereiche der Landstraßen-Sichtsituationen sind in Abbildung 4-44 durch die horizontalen FOV-Winkel über dem Knickwinkel dargestellt. Die einzelnen Situationen unterscheiden sich in ihrem horizontalen Verlauf. Insbesondere sind hier die Kreisverkehrsdurchfahrt (S06) und das Rechtsabbiegen (S08) zu nennen. Die Kurven des äußeren FOV-Winkels dieser beiden komplexen Sichtsituationen unterscheiden sich um bis zu 7°.

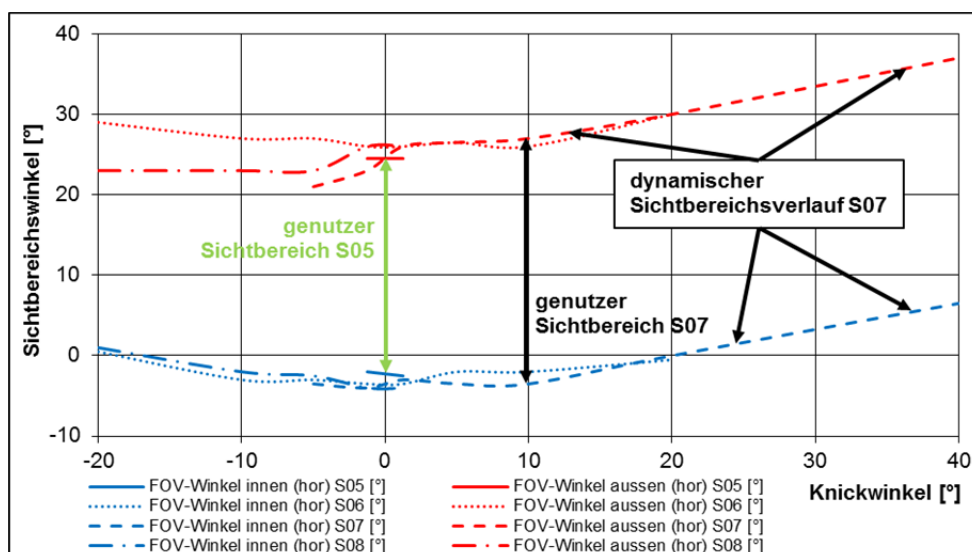


Abbildung 4-44: Genutzte horizontaler dyn. Sichtbereiche der Landstraßen-Sichtsituationen V2 HSL

Zur Beschreibung des dynamischen Sichtbereichs werden neben den horizontalen FOV-Winkeln auch die vertikalen Sichtbereichswinkel herangezogen (vgl. Abbildung 4-45). Sie beschreiben, bei welchem Abstand von der Fahrzeugvorderkante der Fahrer auf die Straße blickt und wieviel er von der vorderen oberen Aufliegerecke sieht.

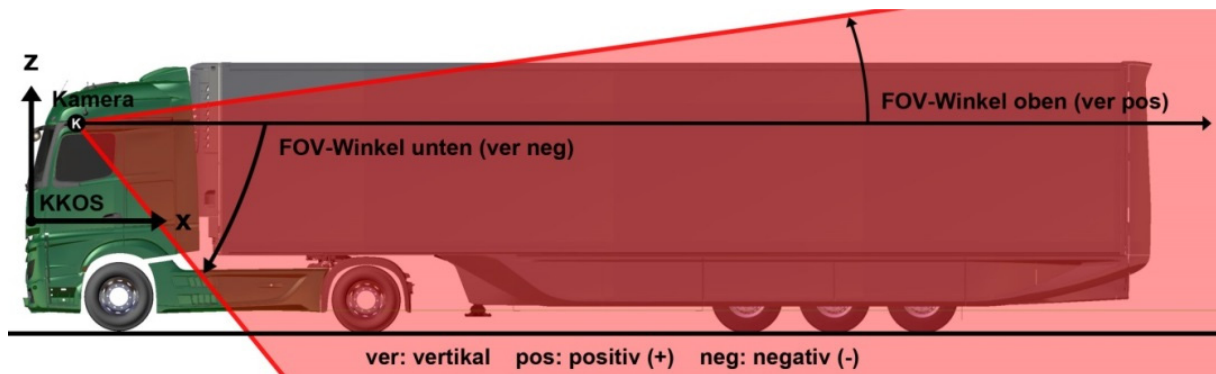


Abbildung 4-45: Definition der vertikalen Sichtbereichswinkel (FOV-Winkel) zur Darstellung des dynamischen Sichtbereichs

Für die betrachteten Sichtsituationen sind die vertikalen Verläufe der dynamischen Sichtbereiche in Abbildung 4-46 dargestellt. Die vertikalen Verläufe aller betrachteten Sichtsituationen unterscheiden sich. Besonders auffällig sind die Abstände der FOV-Winkel der komplexen Sichtsituationen (S06-S08) von den Werten des Baseline-Szenarios S05. Zwischen der Kreisverkehrsdurchfahrt (S06) und der Geradeausfahrt (S05) liegt ein Winkelunterschied von bis zu  $10^\circ$  vor. Der Fahrer blickt zur Durchfahrt des Kreisverkehrs bei einem geringeren Abstand zur Fahrzeugvorderkante als bei der Geradeausfahrt auf die Fahrbahnoberfläche. Bei der betrachteten Kameraposition entspricht das einer Verschiebung nach vorne um ca. 2,2 m. Hypothese 17 wird angenommen, da sich der Verlauf der horizontalen und vertikalen FOV-Winkel für unterschiedliche Sichtsituationen unterscheidet.

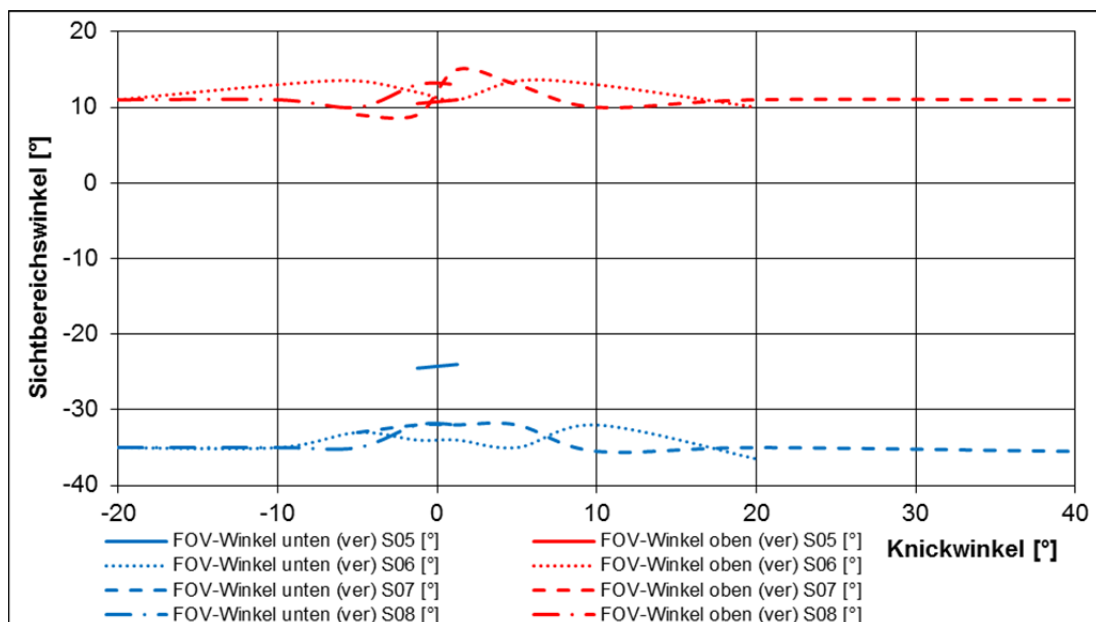


Abbildung 4-46: Genutzte vertikale dyn. Sichtbereiche der Landstraßen-Sichtsituationen V2 HSL

Nach der Betrachtung aller Sichtsituationen können die gesamten genutzten dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht abgeleitet werden. Da sich die Verläufe der verwendeten Situationen unterscheiden werden dazu jeweils die maximalen FOV-Winkel herangezogen. Die Gesamtverläufe der horizontalen FOV-Winkel sind in Abbildung 4-47 für das Fahrzeug V2 dargestellt. Es sind ebenfalls die Fehlertoleranzen der Sichtbereichsbestimmung und die Nutzungshäufigkeit zwischen fahrerseitigem (HSL) und beifahrerseitigem Hauptspiegel (HSR) eingezeichnet. Im Folgenden werden lediglich die Darstellungen des HSL wiedergegeben. Die genutzten Sichtbereiche des HSR sind im Anhang A9 zusammengestellt.

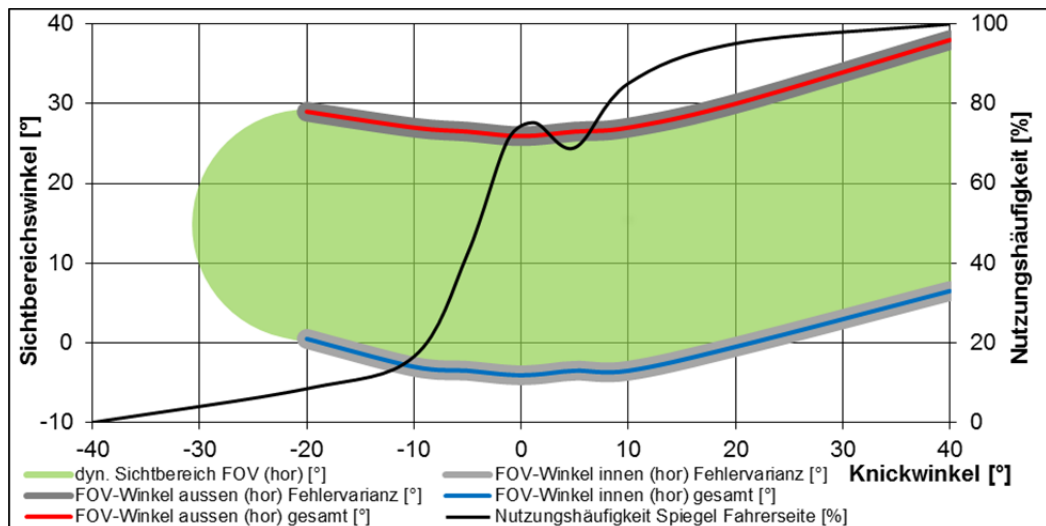


Abbildung 4-47: Genutzte hor. dyn. Sichtbereiche aller Sichtsituationen V2 HSL

Die vertikalen Verläufe zur Repräsentation aller auswertbaren Sichtsituationen sind in Abbildung 4-48 wiedergegeben. Bei der Betrachtung der Darstellungen kann festgestellt werden, dass die Nutzungshäufigkeit stark asymmetrisch verläuft. Bei Rechtskurven ( $KW < -10^\circ$ ) wird häufiger in den rechten, bei Linkscurven ( $KW > 10^\circ$ ) wird häufiger in den linken Hauptspiegel geblickt. Bei der Geradeausfahrt ( $KW = 0^\circ$ ) werden beide Spiegel berücksichtigt, wobei die Nutzungshäufigkeit des HSL überwiegt. Auch die nutzbaren Sichtbereiche des HSL und HSR unterscheiden sich. Aufgrund des größeren Abstands zwischen Augpunkt und beifahrerseitigem Hauptspiegel (vgl. ISO/FDIS 16505 2014 B.6.1) werden im HSR bei gleichen Spiegelabmessungen sowohl horizontal als auch vertikal kleinere dynamische Sichtbereiche dargestellt (vgl. Anhang A9).

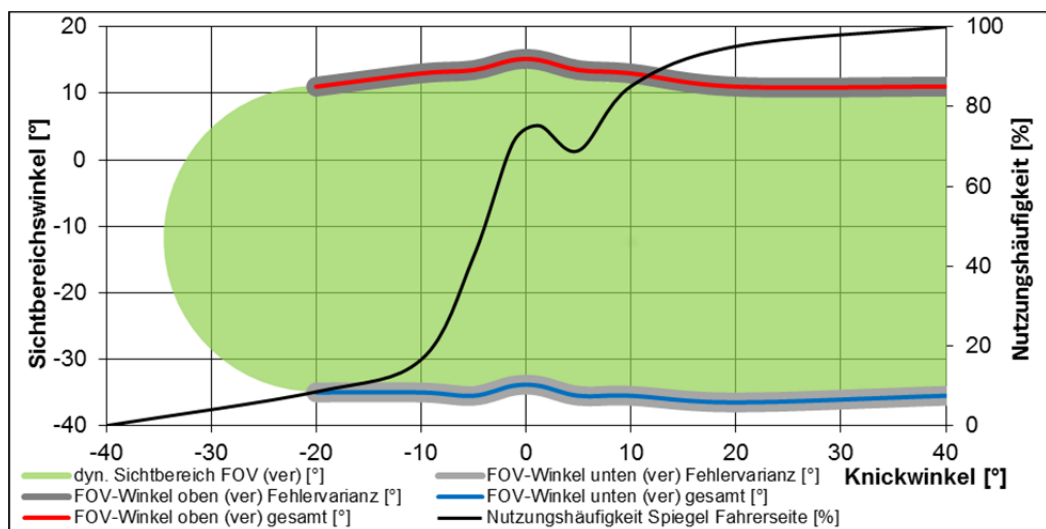


Abbildung 4-48: Genutzte ver. dyn. Sichtbereiche aller Sichtsituationen V2 HSL

#### 4.4.3 Einfluss der Fahrzeugvariante (Faktor C)

Um den Einfluss der Fahrzeugvariante auf die Verläufe der dynamischen Sichtbereiche zu untersuchen werden im Folgenden die Kennwerte des Referenz-Sattelzugs (V2) und des Sattelzugs mit schmaler und niedrig aufgesetzter Kabine (V3) miteinander verglichen. Diese Fahrzeuge unterscheiden sich in den konstruktiven Abmessungen zwischen Auslegungsaugpunkt (ORP), Spiegelfläche und Fahrbahnoberfläche (vgl. Kapitel 3.1.3). Die Zugzusammensetzung und damit das dynamische Verhalten des Aufliegers als Sichtziel unterscheiden sich nicht (vgl. Bothe et al. 2013b S. 298 ff., Zaindl et al. 2013 S. 3 ff.). Bei der Definition der Hypothese wurden unterschiedliche Verläufe der dynamischen Sichtbereiche erwartet:



**Hypothese 18:** Der Verlauf dynamischer Sichtbereiche der indirekten Sicht verschiedener Fahrzeugvarianten unterscheidet sich. (H18)

In Abbildung 4-49 sind die horizontalen dynamischen Sichtbereiche der Fahrzeuge V2 und V3 dargestellt. Die Fehlervarianz, die durch die Toleranzen der statischen und dynamischen Datenerhebung und des Bewertungsverfahrens bei der FOV-Winkelbestimmung entsteht, ist auf die Werte des Referenzfahrzeugs V2 aufgetragen. Alle Werte der horizontalen FOV-Winkel des Versuchsfahrzeugs V3 liegen innerhalb dieser Fehlervarianz. Damit kann kein Unterschied zwischen den horizontalen Sichtbereichswinkeln der beiden Fahrzeuge festgestellt werden.

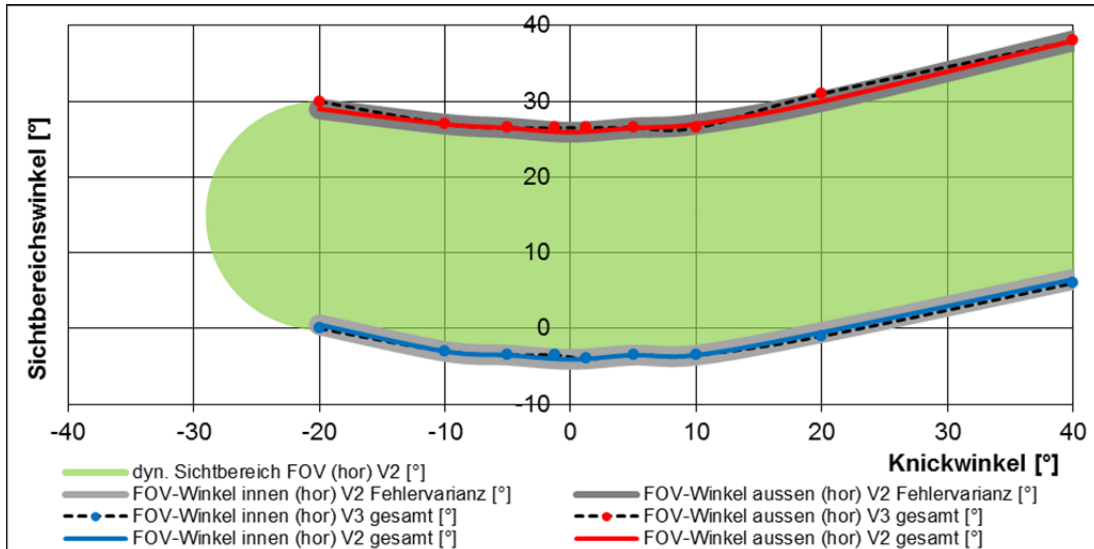


Abbildung 4-49: Genutzte horizontale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen HSL V2-V3

Die vertikalen FOV-Winkel der beiden Fahrzeuge sind in Abbildung 4-50 aufgetragen. Die Werte des Fahrzeugs V3 liegen teilweise außerhalb der Fehlervarianzbereiche des Referenz-Fahrzeugs V2. Dieser minimale Unterschied in den vertikalen FOV-Winkeln ist auf die fahrerhausfeste Definition der Sichtbereichswinkel, insbesondere deren Referenzposition (Kameraposition) zurückzuführen. Die Kamerapositionen der Fahrzeuge V2 und V3 unterscheiden sich in Bezug auf das Fahrzeugumfeld nur in der Höhe der Positionierung über der Fahrbahnoberfläche. Diese Höhendifferenz von 165 mm ist auf die unterschiedlichen Aufsetzhöhen (vgl. Kapitel 3.1.3) begründet. Die dynamischen Sichtbereiche außerhalb des Fahrzeugs unterscheiden sich somit auch in vertikaler Richtung nicht zwischen den beiden Faktorstufen. Die Unterschiedshypothese H18 kann durch die Auswertung der von der Fahrzeugvariante abhängigen dynamischen Sichtbereiche nicht bestätigt werden.

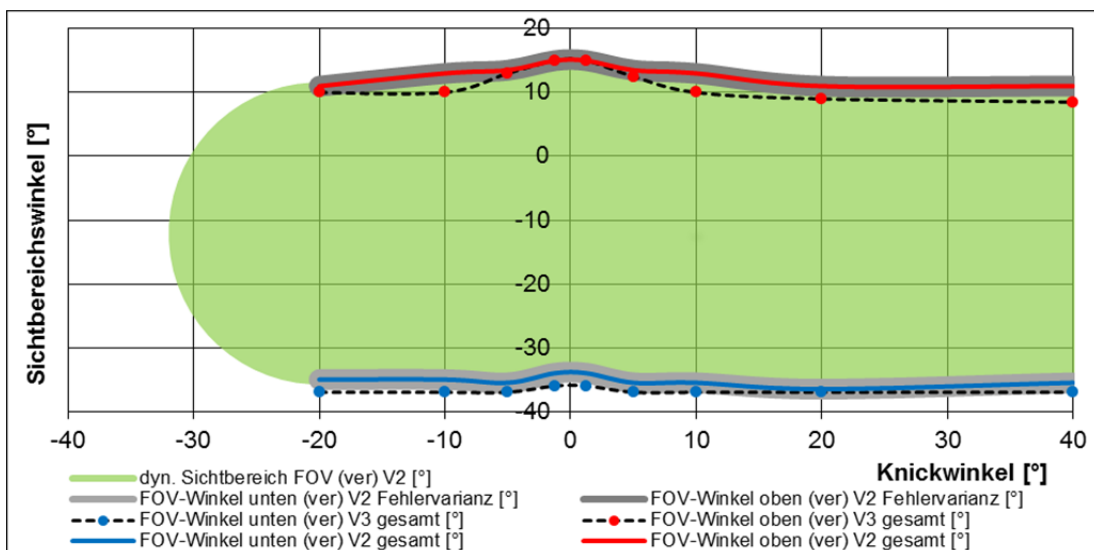


Abbildung 4-50: Genutzte vertikale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen HSL V2-V3

#### 4.4.4 Einfluss der Körperhöhe (Faktor A)

Da eine Abhängigkeit der Augpunktlage von der Körperhöhe der Probanden vermutet wird, sollte auch eine Abhängigkeit der dynamischen Sichtbereiche von der Körperhöhe betrachtet werden. Zaindl (2013 S. 2) berichtet, dass große Fahrer die Augpunktlagenveränderung und die dadurch resultierende Sichtbereichsverschiebung stärker als kleine Fahrer einbringen können. Dieser Aussage kann jedoch die Beobachtung entgegengesetzt werden, dass zur Erfüllung der fernverkehrstypischen Transportaufgabe (vgl. Kapitel 1.1.1), sich die Sichtziele außerhalb des Fahrzeugs (vgl. Kapitel 2.1.3) für unterschiedliche Fahrer nicht unterscheiden. Zur Untersuchung dieses Sachverhalts wird der Einfluss der Körperhöhe auf den Verlauf der dynamischen Sichtbereiche betrachtet:

**Hypothese 19:** Der Verlauf dynamischer Sichtbereiche der indirekten Sicht verschiedener Körperhöhengruppen unterscheidet sich. (H19)

Die dynamischen Sichtbereiche der drei Körperhöhengruppen (KHG) werden anhand der horizontalen FOV-Winkel in Fahrzeug V2 dargestellt. Die Sichtbereiche der kleinen, mittelgroßen und großen Probanden werden mit den Kennlinien aller Versuchspersonen verglichen. Alle FOV-Winkel der Körperhöhengruppen liegen innerhalb des Fehlervarianzbereichs der Gesamtstichprobe. Daher kann für die horizontalen Verläufe der dynamischen Sichtbereiche kein durch die KHG hervorgerufener Unterschied festgestellt werden.

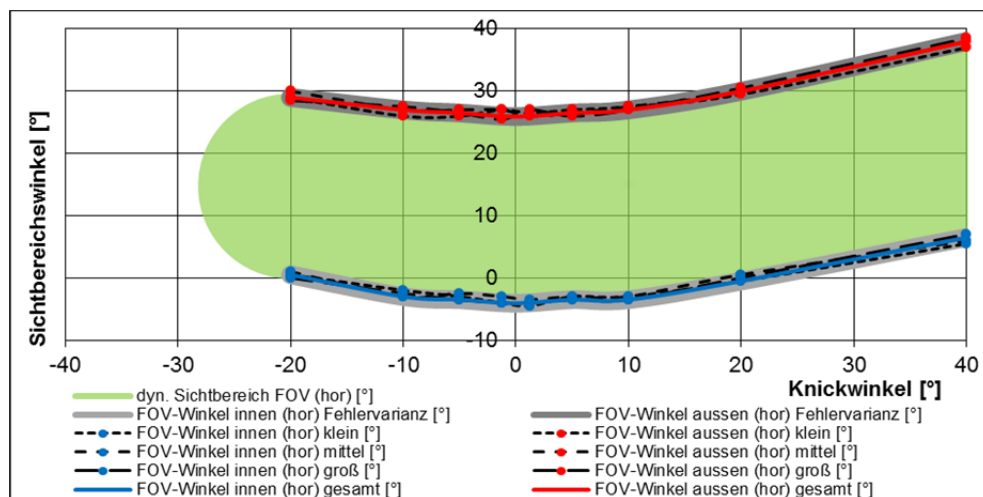


Abbildung 4-51: Genutzte horizontale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen V2 HSL KHG

Die Darstellung der von den Fahrern genutzten vertikalen dynamischen Sichtbereiche ist mit Abbildung 4-52 gegeben. Auch bei der Betrachtung der vertikalen FOV-Winkel kann kein Einfluss der Körperhöhengruppe auf den resultierenden Sichtbereichsverlauf nachgewiesen werden.

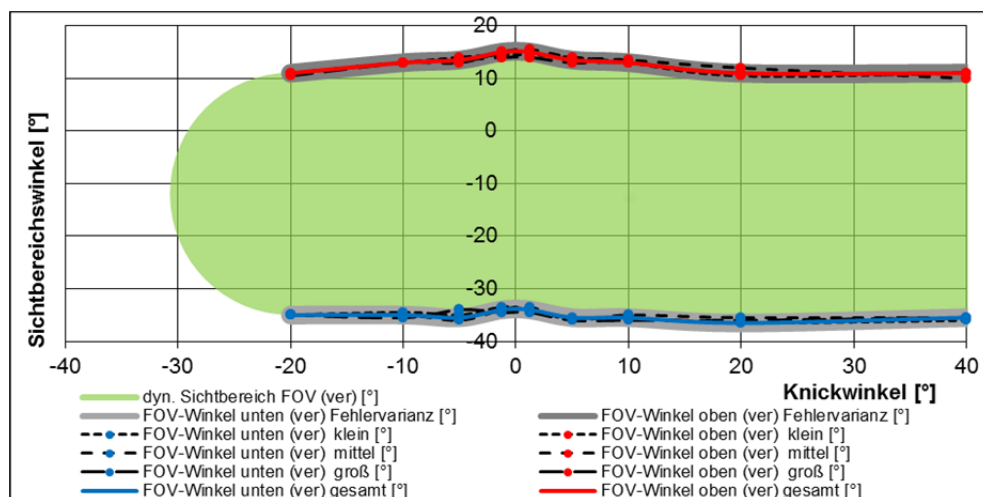


Abbildung 4-52: Genutzte vertikale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen V2 HSL KHG

Die dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht verschiedener Körperhöhengruppen (KHG) unterscheiden sich weder in horizontaler noch in vertikaler Orientierung. Die Unterschiedshypothese H19 wird daher nicht bestätigt. Bei der Umsetzung dieser Erkenntnisse zur ergonomischen Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) ist bei der Wahl des dargestellten Sichtbereichs kein Einfluss der Körperhöhe zu berücksichtigen. Im Unterschied zu Spiegelsystemen, bei denen die Spiegeloberfläche der anthropometrisch bedingten Augpunktlage angepasst werden muss, ist bei KMS lediglich auf eine Ausrichtung des Monitors zur Berücksichtigung aller Augpunktlagen zu achten.

## 4.5 Ergonomische Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS)

Die aus der Analyse der dynamischen Sichtsituationen gewonnenen Erkenntnisse werden zur ergonomischen Gestaltung der noch offenen Themenpunkte bei der Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) (vgl. Kapitel 2.2) herangezogen. Die sichtwinkelabhängige Darstellungsqualität von Monitoren wird durch die Ausrichtung auf die dynamischen Augpunktlagen berücksichtigt. Die automatisierte Anpassung der dargestellten Sichtbereiche der indirekten Sicht wird durch eine Verschiebekennlinie des KMS umgesetzt. Dadurch kann das neuartige elektronische Sichtsystem, mit technologiebedingt anderen Eigenschaften als das konventionelle Spiegelsystem, an die ergonomischen Anforderungen der Lkw-Fahrer im Fernverkehrsumfeld angepasst werden.

### 4.5.1 Monitorausrichtung auf die dynamischen Augpunktlagen

Nach der Analyse der statischen und dynamischen Augpunktlagenverteilungen wurde festgestellt, dass sich die beiden Vergleichsgruppen sowohl in der Lage der Mittelwerte als auch in der Streubreite der Verteilung auslegungsrelevant unterscheiden. Daher müssen zur ergonomischen Gestaltung von Fahrzeugkomponenten, die in eine Sichtinteraktion eingebunden sind, dynamische Augpunktlagen herangezogen werden.

Alle während der fernverkehrstypischen Nutzungsszenarien (S01, S02 & S05-S11) relevanten dynamischen Augpunktlagen werden je Fahrzeugvariante in einem dreidimensionalen Körper zusammengefasst. Dieser Auslegungskörper wird Augellipsoid genannt und beinhaltet mindestens 90% der dynamischen Augpunktlagen beim Blick in die ausgewerteten Sichtzielflächen (AOI1-11). Damit repräsentiert der Augellipsoid den auslegungsrelevanten Anteil (vgl. Speyer 2005 S. 1 ff.) der dynamischen Augpunktlagen. Der für das Referenzfahrzeug V2 konstruierte Augellipsoid ist in Abbildung 4-53 dargestellt. Neben dem Auslegungskörper sind auch dessen Mittelpunkt (MW dyn GAUM gesamt) und die mittleren Augpunktlagen der  $n = 46$  Versuchspersonen (MW dyn GAUM Proband) abgebildet.

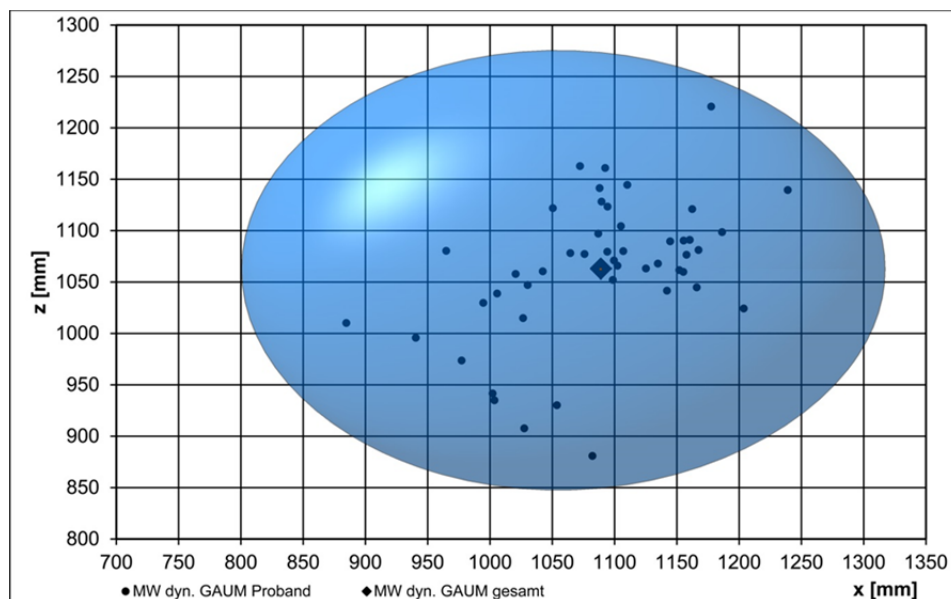


Abbildung 4-53: Augellipsoid zur Beschreibung der dyn. Augpunktlagen V2  $n = 46$  Seitenansicht

Die Darstellungsqualität eines im KMS eingesetzten Displays ist vom Winkel in dem auf die Darstellungsfläche geblickt wird abhängig (vgl. Kapitel 2.2.4). Displaybezogen sind Öffnungswinkel definiert, innerhalb derer eine ausreichende Darstellungsqualität sichergestellt wird. Diese Display-Öffnungswinkel sind von der Technologie und Bauweise des Monitors abhängig und werden als horizontale und vertikale auf die Displaynormale bezogene Winkelwerte angegeben.

In Abbildung 4-54 ist der fahrerseitige Monitor des KMS und der Augellipsoid im Fahrerhaus dargestellt. Zur ergonomischen Auslegung wird die Displayoberfläche so angestellt, dass die Displaynormale durch den Mittelpunkt des Augellipsoids verläuft. Die Anbindung am Fahrerhaus wird so gewählt, dass die durch das System hervorgerufenen Sichtverdeckungen der direkten Sicht (vgl. Kapitel 2.1.3) minimal ausfallen. Da der Mittelpunkt des Auslegungskörpers den Mittelwert aller betrachteten dynamischen Augpunktlagenverteilungen darstellt ist sichergestellt, dass der Monitor für die dynamische Sichtinteraktion im Fahrzeug optimal positioniert ist. Zur Absicherung der gewählten Monitorposition und -ausrichtung muss berücksichtigt werden, dass der gesamte Augellipsoid von den Displayöffnungswinkeln eingeschlossen wird. Damit ist für mindestens 90% der dynamischen Augpunktlagen eine optimale Darstellungsqualität des auf dem Monitor dargestellten Bildes sichergestellt. Die Auslegungsschritte zur Positionierung des fahrerseitigen Monitors werden ebenfalls für die Beifahrerseite durchgeführt. Der in Abbildung 4-54 dargestellte Monitor des KMS ist damit ergonomisch optimal auf das reale Nutzungsverhalten des Fahrers im Fahrzeug ausgelegt.

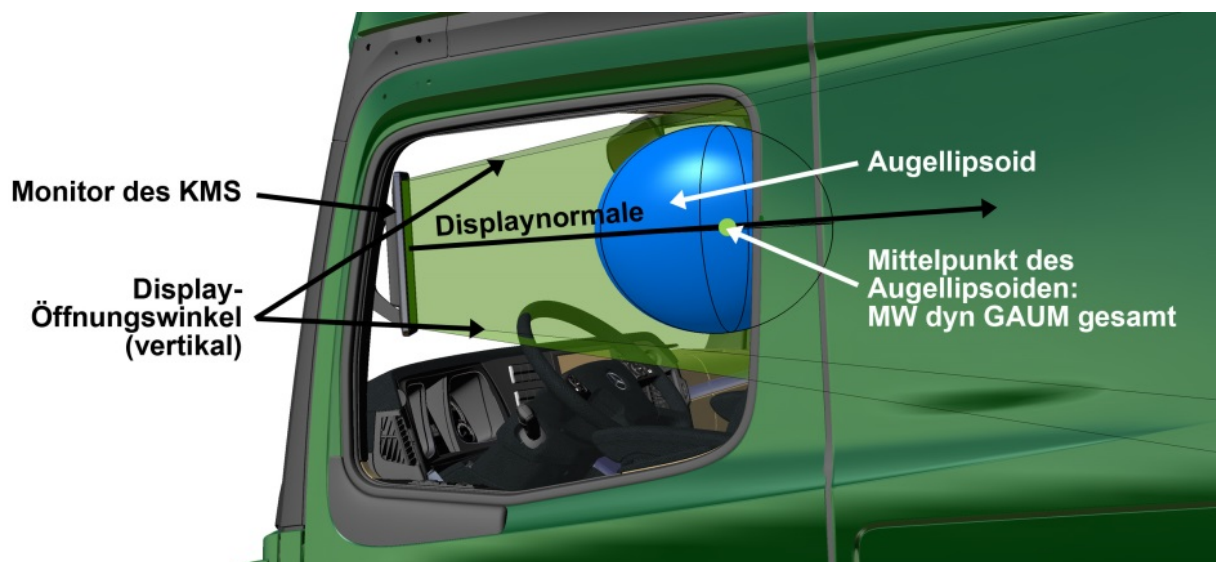


Abbildung 4-54: Ausrichtung der Displayoberfläche auf den MW der dynamischen Augpunktlagen und Absicherung der Öffnungswinkel anhand des Augellipsoids

#### 4.5.2 Verschiebekennlinie des Kamera-Monitor-Systems (KMS)

Bei einem wie in Kapitel 2.2 beschriebenen Kamera-Monitor-System (KMS) können die auf dem Display dargestellten Sichtbereiche der indirekten Sicht automatisiert den situationsabhängigen Anforderungen des Fahrers angepasst werden (vgl. Bothe et al. 2013e S. 9). Für den horizontalen Sichtbereich wird die Auswahl des dargestellten Bildes durch den inneren und äußeren Darstellungswinkel definiert (vgl. Abbildung 4-55). Mit der Festlegung dieser Winkel über einen Knickwinkelbereich von  $-90^\circ$  bis  $+90^\circ$  entstehen die horizontalen Verschiebekennlinien. Der Bereich zwischen der inneren und äußeren Kennlinie repräsentiert den dargestellten dynamischen Sichtbereich. Die Variationsmöglichkeit des dargestellten Sichtbereichs ist durch die Öffnungswinkel der Kamera (KMSlim) begrenzt. Als Referenz sind die regulativen Vorgaben der ECE-R46 (ECE-R 46/02 2009 Abs. 15.2.4.2) für die gestreckte Zugkombination eingezeichnet. Der Abstand zwischen innerem und äußerem Darstellungswinkel beeinflusst die Objektgröße und die Breite des dargestellten Sichtbereichs. Wird der Abstand erhöht können größere Bereiche des Fahrzeugumfelds wiedergegeben werden, die Darstellungsgröße von Objekten wie anderen Verkehrsteilnehmern oder Spurmarkierungen wird dadurch jedoch verringert. Der Abstand kann unter Berücksichtigung der zulassungsrelevanten Vorgaben (vgl. ISO/FDIS 16505 2014 S. 49 ff.) frei gewählt werden.



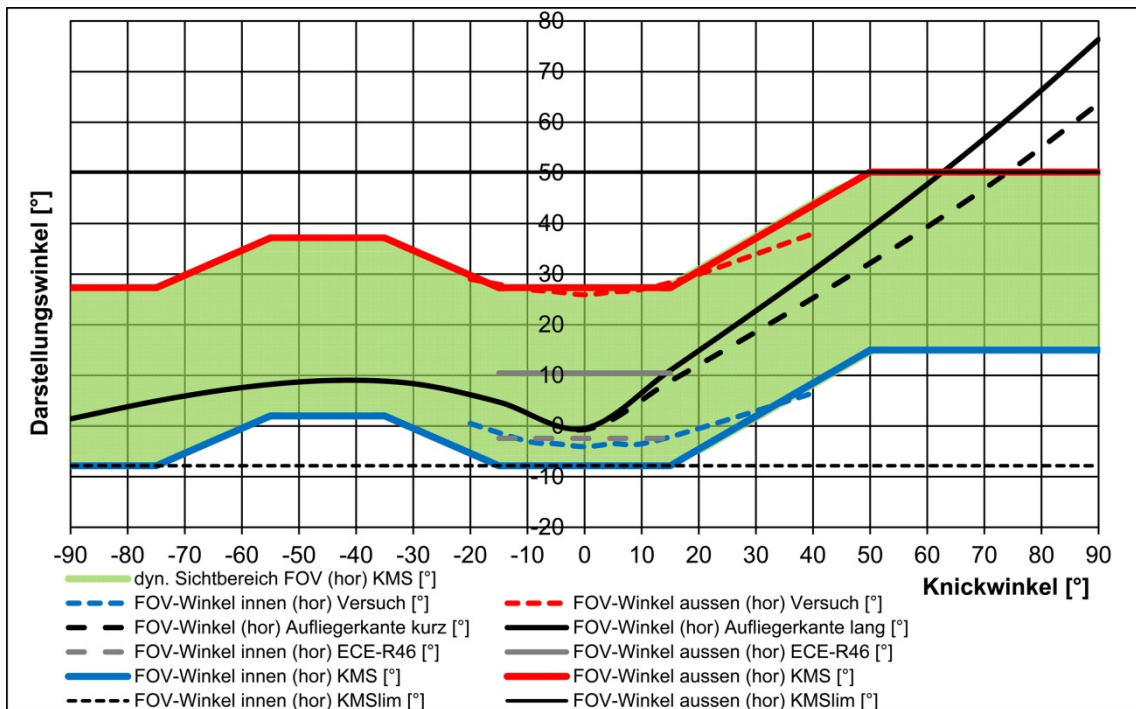


Abbildung 4-55: Horizontale Verschiebekennlinien des KMS Klasse II Fahrerseite

Die Erkenntnisse aus der Analyse der dynamischen Sichtbereiche fließen in die ergonomische Auslegung der Verschiebekennlinie des Kamera-Monitor-Systems (KMS) ein. In Abbildung 4-55 sind die während des Versuchs ermittelten inneren und äußeren FOV-Winkel im Knickwinkelbereich zwischen  $-20^{\circ}$  und  $+40^{\circ}$  eingezeichnet. Dies ist der während der ausgewerteten Sichtsituationen genutzte Knickwinkelbereich des linken Hauptspiegels (HSL) und repräsentiert mit Ausnahme der nicht berücksichtigten Rangiersituationen die fernverkehrstypische Nutzung. In Abbildung 4-56 sind die hor. Verschiebekennlinien für die Beifahrerseite dargestellt. Die Verschiebekennlinien werden mit einem konstanten Verlauf zwischen  $-15^{\circ}$  und  $+15^{\circ}$  an die FOV-Winkel des Versuchs angelegt. Für die restlichen Knickwinkelbereiche werden Verschiebungen des dargestellten Bildbereichs vorgenommen.

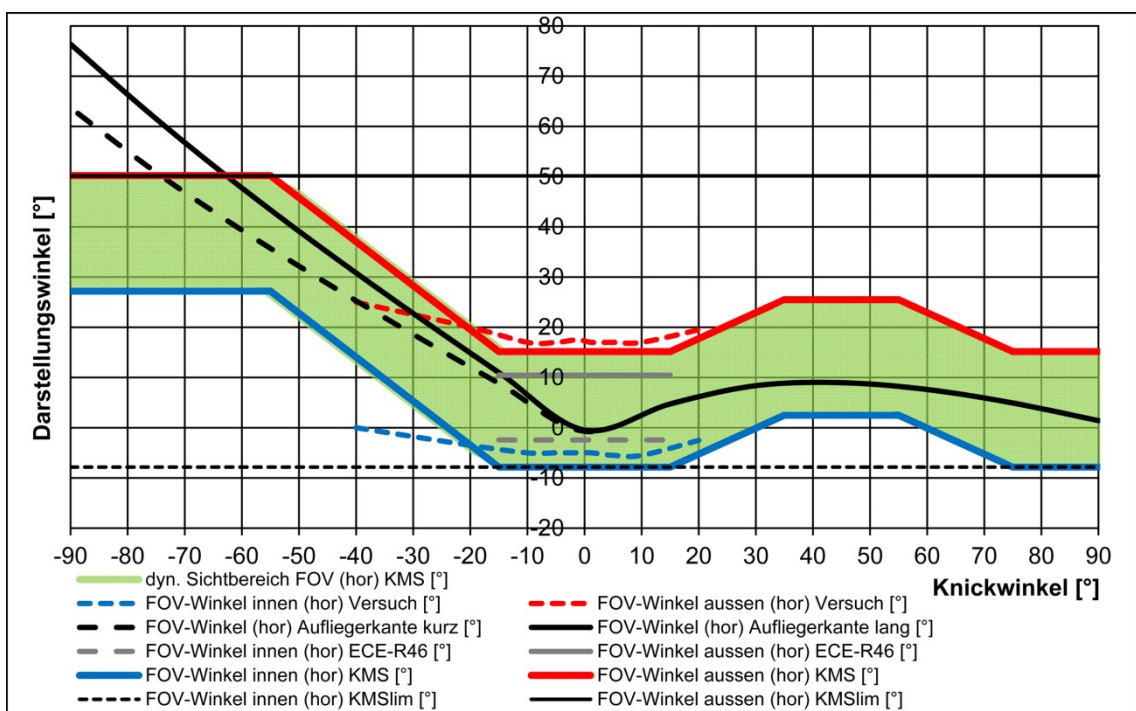


Abbildung 4-56: Horizontale Verschiebekennlinien des KMS Klasse II Beifahrerseite

Um die Kennlinien auch für die im Versuch nicht aufgetretenen Knickwinkelbereiche, die nur während Rangiersituationen verwendet werden, auszulegen wird das sichtrelevante Aufliegerverhalten genauer betrachtet. Innerhalb von Rangiersituationen sind vor allem die hinteren und vorderen Aufliegerkanten von Interesse (vgl. Bothe et al. 2013b S. 298 ff.; Zaindl et al. 2013 S. 3 ff.). Daher sind in Abbildung 4-55 die auf den Darstellungswinkel bezogenen Positionen der relevanten Aufliegerkanten für kurze und lange Anhänger eingezeichnet. Auf der Fahrerseite wird vom Fahrer beim Linksabbiegen ( $KW > 10^\circ$ ) die Darstellung der hinteren, beim Rechtsabbiegen ( $KW < -10^\circ$ ) die Wiedergabe der vorderen Aufliegerkante benötigt. Der Darstellungswinkel der hinteren Kante steigt mit wachsendem Knickwinkel stetig an. Der Winkel der Vorderkante steigt bei wachsendem negativem Knickwinkel zunächst an um ab einem Wert von  $-40^\circ$  wieder abzufallen. Dieses Verhalten ist den geometrischen Gegebenheiten der Knickkinematik eines Sattelzugs geschuldet. Unter der Vorgabe, dass die relevanten Aufliegerkanten so lange wie möglich vom Kamera-Monitor-System (KMS) dargestellt werden, wird die Verschiebekennlinie über den gesamten Knickwinkelbereich definiert.

Neben der Auslegung des horizontalen Verschiebeverhaltens muss auch der wiedergegebene vertikale Sichtbereich ergonomisch gestaltet werden. In Abbildung 4-57 sind die beschriebenen Kennlinien für den vertikalen Darstellungsbereich des fahrerseitigen KMS abgebildet. Aufgrund der geringen Variation der im Versuch ermittelten FOV-Winkel und des Aufliegerverhaltens, werden der untere und obere Darstellungswinkel über den gesamten Knickwinkelbereich konstant gehalten. Das bedeutet, dass der auf dem Monitor dargestellte Bildbereich knickwinkelabhängig nur in horizontaler nicht aber in vertikaler Richtung verschoben wird (vgl. Kapitel 2.2.5). Durch das reduzierte Verschiebeverhalten wird das mentale Modell, das sich der Lkw-Fahrer vom Systemverhalten des KMS aufbaut, so einfach und damit intuitiv wie möglich gehalten.

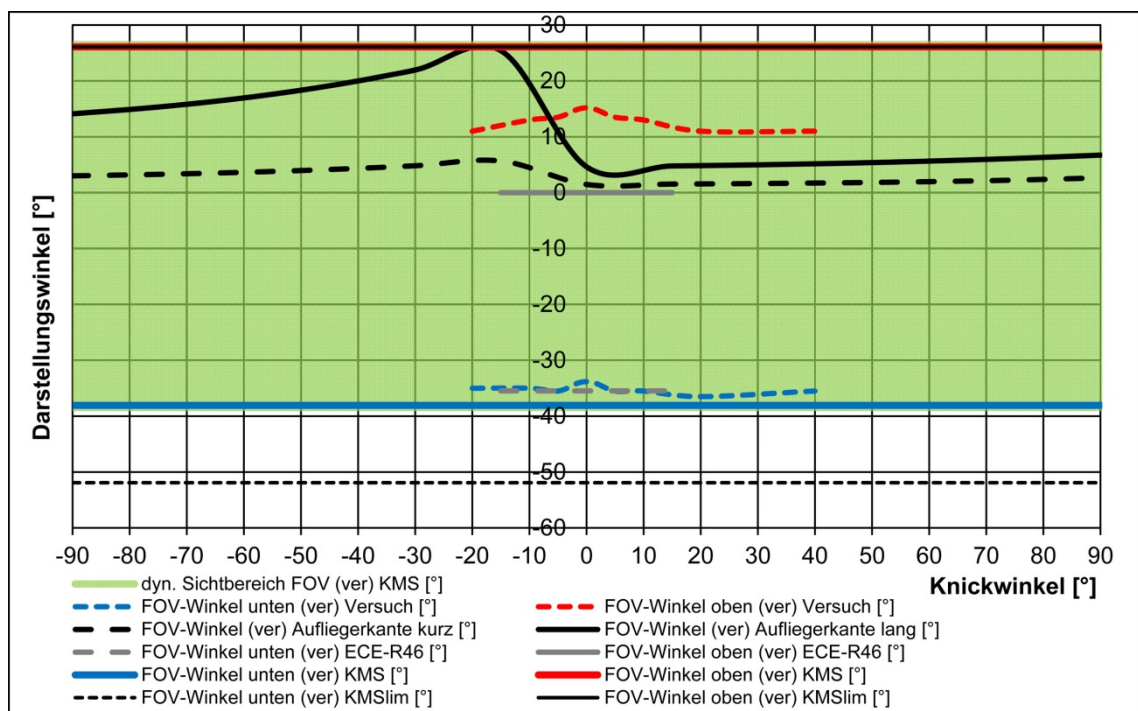


Abbildung 4-57: Vertikale Verschiebekennlinien des KMS Klasse II Fahrerseite

Die beschriebene Vorgehensweise zur ergonomischen Auslegung der Verschiebekennlinien wird auch für die beifahrerseitigen Darstellungsbereiche durchgeführt. Die Kennlinien der KMS-Darstellung für die Beifahrerseite sind in Anhang A11 abgebildet. Durch die innerhalb dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse über die dynamische Sichtinteraktion zwischen Fahrer, Umwelt und konventionellem Spiegelsystem wird eine ergonomische Auslegung des technologiebedingt notwendigen dynamischen Darstellungsverhaltens eines KMS ermöglicht. Damit kann ein Kamera-Monitor-System (KMS), das neben den regulativen Anforderungen auch die Belange der Fahrer berücksichtigt, entwickelt werden.

---

## 5 Diskussion der Ergebnisse

---

### 5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

---

Innerhalb dieses Kapitels werden die Ergebnisse der Datenanalyse chronologisch zusammengestellt und kurz erläutert. Es werden die in Kapitel 2.4 aufgestellten Hypothesen beantwortet und die auslegungsrelevanten Kennwerte vorgestellt. Für eine ausführliche Darstellung der Zusammenhänge wird an das jeweilige Unterkapitel der Analyse verwiesen. In Tabelle 5-1 sind die Ergebnisse der in Kapitel 4.2 durchgeführten Analysen und die Verweise zu den Detailuntersuchungen zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Ergebnisse der Analyse statischer und dynamischer Augpunktlagenverteilungen

H1	4.2.1	Die mittleren dynamischen Augpunktlagen unterscheiden sich von den mittleren statischen Augpunktlagen.	bestätigt
H2	4.2.1	Die Streubreite dynamischer Augpunktlagen ist größer als die Streubreite statischer Augpunktlagen.	bestätigt
H3	4.2.2	Die dynamischen Augpunktlagen kleiner Probanden liegen in Fahrzeughochrichtung tiefer als die dynamischen Augpunktlagen größer Probanden.	bestätigt
H4	4.2.3	Die dynamischen Augpunktlagen schlanker Probanden liegen in Fahrzeugfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen korpulenter Probanden.	nicht bestätigt
H5	4.2.4	Die dynamischen Augpunktlagenverteilungen verschiedener Fahrzeugvarianten unterscheiden sich.	bestätigt
H6	4.2.5	Bei komplexen Sichtsituationen wird häufiger als bei Baseline-Sichtsituationen in die Spiegel geblickt.	bestätigt
H7	4.2.5	Die dynamischen Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen liegen in Fahrzeugfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen bei Baseline-Sichtsituationen.	bestätigt
H8	4.2.5	Die dynamischen Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen während der Stadt- oder Überlandfahrt liegen in Fahrzeugfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen während der Autobahnfahrt	bestätigt
H9	4.2.5	Die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen ist größer als die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei Baseline-Sichtsituationen.	bestätigt
H10	4.2.5	Die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen während der Stadt- oder Überlandfahrt ist größer als die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen während der Autobahnfahrt.	bestätigt

Es wird ein Unterschied zwischen den mittleren dynamischen und mittleren statischen Augpunktlagen festgestellt (H1). Die dynamischen Augpunktlagen liegen im Vergleich zu den statischen Augpunktlagen weiter vorne (MWD = 157,39 mm) und tiefer (MWD = 94,36 mm) im Fahrerhaus. Sie sind ebenfalls mehr zur Sitzmittelebene hin orientiert (MDD = 39,33 mm). Der nachgewiesene Unterschied ist auslegungsrelevant.

Es wird ein Unterschied zwischen den Streubreiten der statischen und dynamischen Augpunktlagenverteilung nachgewiesen (H2). Die Streubreite dynamischer Augpunktlagen ist größer als die Streubreite statischer Augpunktlagen. Für die ergonomische Auslegung sind insbesondere die Unterschiede der Streuung in x-Richtung (MDD = 25,46 mm) und der dreidimensionale Offsetwert (MDD = 32,04 mm) zu berücksichtigen.

Nach der Analyse der statischen und dynamischen Augpunktlagenverteilungen kann festgestellt werden, dass sich die beiden Vergleichsgruppen sowohl in der Lage der Mittelwerte als auch in der Streubreite der Verteilung auslegungsrelevant unterscheiden. Nur die Verteilungen dynamischer Augpunktlagen können das reale Nutzungsverhalten innerhalb des bewegten Fahrzeugs repräsentieren. Daher müssen zur ergonomischen Gestaltung von Fahrzeugkomponenten, die in eine Sichtinteraktion eingebunden sind, dynamische Augpunktlagen herangezogen werden.

---

Die dynamischen Augpunktlagen kleiner Probanden liegen in Fahrzeughochrichtung tiefer als die dynamischen Augpunktlagen großer Probanden (H3). Durch einen Randgruppenvergleich kann der Einfluss der Körperhöhe auf die z-Position der mittleren dynamischen Augpunktlage nachgewiesen werden. Dynamische Augpunktlagen kleiner Personen liegen im Vergleich zu den Kennwerten großer Personen auslegungsrelevant tiefer (MWD = 29,46 mm) im Fahrerhaus.

Es kann kein Einfluss des Taillenumfangs auf die Position der mittleren dynamischen Augpunktlagen in Fahrzeuglängsrichtung nachgewiesen werden (H4). Durch eine Varianzanalyse wird festgestellt, dass sich die Augpunktlagen der Körpermaßgruppen in ihrer x-Lage nicht signifikant ( $F(2,149) = 0,79$ ;  $p = 0,463$ ) unterscheiden. Die aufgestellte Unterschiedshypothese wird nicht bestätigt.

Eine Abhängigkeit der mittleren dynamischen Augpunktlage von der Fahrzeugvariante kann nachgewiesen werden (H5). Der Gliederzug (V1) und der Referenzsattelzug (V2) unterscheiden sich mit einer Mittelwertdifferenz (MWD) von 80,67 mm in Fahrzeuglängsrichtung. In derselben Richtung weisen der Referenzsattelzug (V2) und der schmale Sattelzug (V3) eine MWD von 53,85 mm auf. In Fahrzeugquerrichtung unterscheiden sich V1 und V2 mit einer MWD = 13,90 mm. V2 und V3 besitzen eine MWD von 10,74 mm. Damit unterscheidet sich die Fahrzeuge V1 und V3 auslegungsrelevant vom Referenzfahrzeug V2. Der Unterschied in Fahrzeuglängsrichtung ist am stärksten ausgeprägt.

Für die betrachteten Landstraßen-Sichtsituationen kann festgestellt werden, dass bei komplexen Sichtsituationen häufiger als bei Baseline-Sichtsituationen in den Spiegel geblickt wird (H6). Durch den Vergleich der relativen Häufigkeit kann berichtet werden, dass im Mittel während der Kreisverkehrsdurchfahrt (S06) 14mal so oft, beim Linksabbiegen auf eine Vorfahrtstraße (S07) 20mal so oft und beim Rechtsabbiegen unter spitzem Winkel (S08) 7mal so oft wie während der Geradeausfahrt (S05) in den Spiegel geblickt wird.

Die dynamischen Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen liegen in Fahrzeugfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen bei Baseline-Sichtsituationen (H7). Durch die Untersuchung kann eine Abhängigkeit der mittleren dynamischen Augpunktlagen von der Komplexität der Sichtsituation nachgewiesen werden. Die Messwerte der Sichtsituationen S06-S08 liegen in Fahrzeugfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen der Baseline-Sichtsituation (S05). Die Mittelwertdifferenz (MWD) liegt für S05-S06 bei 27,34 mm, für S05-S07 bei 28,51 mm und für S05-S08 bei 24,66 mm und damit durchgehend im auslegungsrelevanten Bereich.

Es kann ebenfalls gezeigt werden, dass die komplexen Sichtsituationen innerhalb der Stadt- und Überlandfahrten im Vergleich zur Autobahnsituation zu nach vorne verschobenen mittleren Augpunktlagen führen (H8). Die Mittelwertdifferenz (MWD) liegt für S10-S02 bei 37,93 mm und für S10-S06 bei 36,58 mm und damit jeweils im auslegungsrelevanten Bereich. Es kann berichtet werden, dass fahrstreckenabhängig unterschiedliche Niveaus der Komplexität dynamischer Sichtsituationen existieren. Autobahnsituationen sind weniger komplex als Stadt- oder Überlandsituationen.

Die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen ist größer als die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei Baseline-Sichtsituationen (H9). Die Offsetwerte aller komplexen Sichtsituationen S06-S08 unterscheiden sich signifikant von den Werten der Baseline-Sichtsituation (S05). Die Differenzwerte der x- und y-Komponente sowie der resultierenden dreidimensionalen Betrachtung liegen jeweils im auslegungsrelevanten Bereich.

Auch die Streubreiten der komplexen Sichtsituationen innerhalb der Stadt- und Überlandfahrten unterscheiden sich im Vergleich zur Autobahnsituation signifikant. Die gerichtete Unterschiedshypothese (H10) wird bestätigt. Bei der Betrachtung der Einzelkomponenten kann gezeigt werden, dass ein Unterschied in der x- und y-Ausdehnung der Streubreite signifikant nachgewiesen wird. In z-Richtung liegt kein signifikanter Unterschied vor.

Der Einfluss der Sichtsituation auf die Verteilung der dynamischen Augpunktlage wurde anhand mehrerer Kennwerte nachgewiesen. Beim Vergleich der mittleren Augpunktlagen ist ein auslegungsrelevanter Einfluss der Sichtsituation auf die mittlere Position in Fahrzeuglängs- und Fahrzeughochrichtung (x, z) festzustellen. Die Streubreiten der dynamischen Augpunktlagen unterscheiden sich situationsabhängig in Fahrzeuglängs- und Fahrzeugquerrichtung (x, y). Daher ist bei der auf dynamischen Augpunktlagen basierenden ergonomischen Auslegung auf die nutzungsorientierte Gewichtung der einzelnen Sichtsituationen zu achten. Innerhalb dieser Arbeit wurde anhand der Zusammensetzung der Auswertungsanteile eine fernverkehrstypische Nutzung betrachtet.



Die automatisierte Regelung, der während der dynamischen Sichtsituationen dargestellten Sichtbereiche eines Kamera-Monitor-Systems (KMS), soll über Fahrzeugparameter gesteuert werden (vgl. Kapitel 2.2.5). Insbesondere werden hier die Parameter des Knickwinkels und der Fahrzeuggeschwindigkeit vorgeschlagen (Bothe et al. 2013e S. 9; Huber et al. 2014 S. 13 f.). In Tabelle 5-2 sind die Ergebnisse der Analysen zur Abhängigkeit von Knickwinkel, Fahrzeuggeschwindigkeit und Sichtsituation zusammengestellt.

Tabelle 5-2: Ergebnisse zur Identifikation des Knickwinkels als Prädiktor dynamischen Sichtverhaltens

<b>H11</b>	<b>4.3.1</b>	Sichtsituationen lassen sich anhand der maximal auftretenden Knickwinkel differenzieren.	<b>bestätigt</b>
<b>H12</b>	<b>4.3.2</b>	Sichtsituationen lassen sich anhand ihrer Geschwindigkeitsverteilung differenzieren.	<b>bestätigt</b>
<b>H13</b>	<b>4.3.3</b>	Bei der Nutzung von Fernverkehrsfahrzeugen im realen Straßenverkehr kann ein Zusammenhang zwischen den maximal auftretenden Knickwinkeln und der Geschwindigkeit festgestellt werden.	<b>bestätigt</b>
<b>H14</b>	<b>4.3.4</b>	Die dynamischen Augpunktlagen bei niedrigen Geschwindigkeiten liegen in Fahrzeughauptrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen bei hohen Geschwindigkeiten.	<b>bestätigt</b>
<b>H15</b>	<b>4.3.5</b>	Die dynamischen Augpunktlagen bei großen Knickwinkeln liegen in Fahrzeughauptrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen bei kleinen Knickwinkeln.	<b>bestätigt</b>

Sichtsituationen können über die maximal auftretenden Knickwinkel differenziert werden (H11). Knickwinkel über  $\pm 10^\circ$  und asymmetrische Verteilungen treten nur bei den komplexen Stadt- und Überlandfahrten auf. Die Baseline-Sichtsituationen S01 und S05 weisen eine symmetrische Verteilung und Knickwinkelbeträge  $< 6^\circ$  auf. Auch bei den Autobahnsituationen S09-S11 sind die auftretenden Knickwinkel symmetrisch verteilt und der Betrag der Maximalwerte ist  $< 2^\circ$ . Die auftretenden Knickwinkel der Stadt- und Landstraßensichtsituationen liegen im Intervall  $\pm 35^\circ$ , die der Autobahnsituationen in Intervall  $\pm 2^\circ$ . Die maximal auftretenden Knickwinkel bei komplexen Sichtsituationen (S06 & S07) sind 10mal so groß, wie die maximalen Knickwinkel der Baseline-Sichtsituation (S05).

Sichtsituationen können ebenfalls über die mittlere Geschwindigkeit differenziert werden (H12). Mittlere Geschwindigkeiten von über 30 km/h treten nur bei Baseline- oder Autobahnsichtsituationen auf. Die Geschwindigkeitsverteilungen sind aufgrund der während der Erhebung auftretenden fahrzeug- und fahrstreckenbasierten Limitierungen nicht normalverteilt. So treten in der Stadt maximale Geschwindigkeiten von 60 km/h auf bei den Autobahnsituationen liegt das Limit bei 90 km/h. Der Medianwert während des Überholvorgangs liegt bei 89,31 km/h. Der Abstand zwischen Medianwert und Maximalwert ist bei den Autobahnsituationen aufgrund der geringen Komplexität geringer als bei den Stadt- und Überlandfahrten.

Ein Zusammenhang zwischen den maximal auftretenden Knickwinkeln und der Fahrzeuggeschwindigkeit kann nachgewiesen werden (H13). Für den Bereich von 0 bis 15 km/h wird ein positiver ( $r_{sp} = 0,793$ ) für den Bereich von 15 bis 90 km/h ein negativer Korrelationskoeffizienten ( $r_{sp} = -0,875$ ) berechnet. In beiden Bereichen liegt somit ein signifikanter Zusammenhang zwischen den maximal auftretenden Knickwinkeln und der Fahrzeuggeschwindigkeit vor.

Es kann eine Abhängigkeit der dynamischen Augpunktlagen von der Fahrzeuggeschwindigkeit nachgewiesen werden (H14). Die mittleren Augpunktlagen liegen bei niedrigen Geschwindigkeiten in x-Richtung weiter vorne als bei hohen Geschwindigkeiten. Es liegt neben der in Fahrzeuginnenrichtung orientierten Abhängigkeit der Augpunktlage von der Geschwindigkeit auch ein Einfluss auf die Position in Fahrzeugquerrichtung vor. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der dynamischen Augpunktlagen ist aufgrund der Mediandifferenz (MDD) von 29,55 mm in x-Richtung und 16,22 mm in y-Richtung bei der ergonomischen Auslegung zu beachten.

Die Abhängigkeit der dynamischen Augpunktlagenposition vom Knickwinkel kann in Fahrzeuginnenrichtung nachgewiesen werden (H15). Aufgrund der großen Mediandifferenzen (MDD) von 55,57 mm bei Rechtskurven ( $-20^\circ < KW < -40^\circ$ ) und 46,39 mm bei Linkscurven ( $20^\circ < KW < 40^\circ$ ) in Bezug auf die Geradeausfahrt ( $-1,25^\circ < KW < 1,25^\circ$ ) ist dieser Effekt bei der ergonomischen

Auslegung von sichtrelevanten Fahrzeugkomponenten zu berücksichtigen. Es tritt auch ein Effekt der Verschiebung in Fahrzeugquerrichtung auf. Hier liegen die Mediandifferenzen (MDD) für Rechtskurven bei 65,43 mm und für Linkskurven bei 17,02 mm. Es liegt damit ein asymmetrischer Effekt der Augpunktlagenverschiebung in Fahrzeugquerrichtung vor. Dieser kann auf die asymmetrischen Verhältnisse der Kopfraumbegrenzungen am Fahrerplatz zurückgeführt werden.

Da mit dem Knickwinkel die beiden Fälle der Links- und Rechtskurve unterschieden werden können besitzt dieser Parameter im Vergleich zur Fahrzeuggeschwindigkeit eine höhere Aussagekraft. Bei der Betrachtung des Einflusses der Geschwindigkeit kann ausschließlich eine Augpunktlagenverschiebung zur Fahrzeugmitte hin nachgewiesen werden. Die Betrachtung der positiven und negativen Knickwinkel liefert bei der Analyse der dynamischen Augpunktlagen in Fahrzeugquerrichtung mehr Informationsgehalt. In der durchgeführten Analyse werden die dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht daher auf den Knickwinkel und nicht auf die Fahrzeuggeschwindigkeit bezogen. Bei der Umsetzung von Verschiebekennlinien für die automatisierte Anpassung des dargestellten Sichtbereichs eines KMS ist ebenfalls die Verwendung des Knickwinkels als Systemparameter der Geschwindigkeit vorzuziehen.

Zur Bestimmung der dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht werden die Sichtdatensätze mit dem in Kapitel 4.1.5 beschriebenen Modell zur Sichtbereichsberechnung ausgewertet. Der Knickwinkel wurde als Prädiktor für das dynamische Sichtverhalten identifiziert. Daher werden die Sichtbereiche für jede Sichtsituation über den genutzten Knickwinkelbereich bestimmt. Die Analyseergebnisse zur Untersuchung der vom Fahrer genutzten Sichtbereiche der Spiegelsicht sind in Tabelle 5-3 aufgelistet.

Tabelle 5-3: Ergebnisse der Analyse dynamischer Sichtbereiche der indirekten Sicht

<b>H16</b>	<b>4.4.2</b>	Die dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht verschiedener Sichtsituationen unterscheiden sich durch die Breite des genutzten Knickwinkelbereiches.	<b>bestätigt</b>
<b>H17</b>	<b>4.4.2</b>	Der Verlauf dynamischer Sichtbereiche der indirekten Sicht verschiedener Sichtsituationen unterscheidet sich.	<b>bestätigt</b>
<b>H18</b>	<b>4.4.3</b>	Der Verlauf dynamischer Sichtbereiche der indirekten Sicht verschiedener Fahrzeugvarianten unterscheidet sich.	<b>nicht bestätigt</b>
<b>H19</b>	<b>4.4.4</b>	Der Verlauf dynamischer Sichtbereiche der indirekten Sicht verschiedener Körperhöhengruppen unterscheidet sich.	<b>nicht bestätigt</b>

Es wird eine Situationsabhängigkeit der Breite des Knickwinkelbereichs, während dessen eine Nutzung der Spiegel stattfindet, nachgewiesen (H16). Die Breite des KW bei der Kreisverkehrsdurchfahrt (S06) beträgt 40°, während der Geradeausfahrt (S05) nur 3°. Die Breite des genutzten Knickwinkelbereichs hängt mit der in Kapitel 4.3.1 nachgewiesenen Abhängigkeit der maximal auftretenden Kickwinkel von den Sichtsituationen zusammen.

Der Verlauf der horizontalen und vertikalen FOV-Winkel für unterschiedliche Sichtsituationen unterscheidet sich (H17). Insbesondere sind hier die Kreisverkehrsdurchfahrt (S06) und das Rechtsabbiegen (S08) zu nennen. Die Kurven des äußeren FOV-Winkels unterscheiden sich um bis zu 7°. Auch die vertikalen Verläufe aller Sichtsituationen sind verschieden. Besonders auffällig sind die Abstände der FOV-Winkel der komplexen Sichtsituationen (S06-S08) von den Werten des Baseline-Szenarios S05. Zwischen der Kreisverkehrsdurchfahrt (S06) und der Geradeausfahrt (S05) liegt ein Winkelunterschied von bis zu 10° vor. Der Fahrer blickt zur Durchfahrt des Kreisverkehrs mit einem geringeren Abstand zur Fahrzeugvorderkante als bei der Geradeausfahrt auf die Fahrbahnoberfläche. Bei der betrachteten Kameraposition entspricht das einer Verschiebung nach vorne um ca. 2,2 m.

Die dynamischen Sichtbereiche außerhalb des Fahrzeugs unterscheiden sich weder in horizontaler noch in vertikaler Richtung zwischen den beiden Fahrzeugvarianten. Die Unterschiedshypothese (H18) kann durch die Auswertung nicht bestätigt werden.

Auch die dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht verschiedener Körperhöhengruppen (KHG) unterscheiden sich weder in horizontaler noch in vertikaler Orientierung. Die Unterschiedshypothese (H19) wird daher nicht bestätigt. Bei der Umsetzung dieser Erkenntnisse zur ergonomischen Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) ist somit bei der Wahl des dargestellten Sichtbereichs kein Einfluss der Körperhöhe zu berücksichtigen.

---

## 5.2 Kritische Reflexion der Untersuchungsschritte

---

Durch die Analyse der im Feldversuch erhobenen Daten konnten Erkenntnisse über das dynamische Sichtverhalten während realer Nutzungsszenarien gewonnen werden. Um die Ableitung von allgemeingültigen Zusammenhängen zu verifizieren, die Anwendung der Erkenntnisse zur ergonomischen Auslegung von KMS abzusichern und die Mess- oder Analyseergebnisse ggf. auf andere Fahrzeugsysteme oder -konzepte übertragen zu können, werden die durchgeführten Untersuchungsschritte kritisch hinterfragt. Im Folgenden werden die Versuchskonzeption, die Rohdatenerhebung sowie die Datenaufbereitung- und Analyse genauer betrachtet.

---

### 5.2.1 Versuchskonzeption und Datenaufzeichnung

---

Zur Durchführung des Versuchs wurden 180 männliche Lkw-Fahrer, die in ihrem Arbeitsalltag das jeweilige Versuchsfahrzeug steuern, ausgewählt. Sie repräsentieren die Population der deutschen Lkw-Fahrer in den anthropometrischen Merkmalen der Körperhöhe (Faktor A) und des Taillenumfangs (Faktor C) (vgl. Kapitel 3.1.1 und Kapitel 3.1.2; Jürgens et al. 2000 S. 30 ff.). Es wurden ebenfalls die gruppenspezifischen demographischen Eigenschaften (vgl. Kapitel 3.3.6; Jürgens et al. 2000 S. 26 ff.) berücksichtigt. Die regionale Zusammensetzung der Stichprobe ist jedoch auf den süddeutschen Raum begrenzt. Es konnten nicht, wie es bei einer anthropometrischen Reihenummessung üblich ist (vgl. Jürgens et al. 2000 S. 25), Versuchspersonen aus mehreren Regionen akquiriert werden. Daher wurde bei der Einteilung der Faktorstufen auf die von Jürgens (2001 S. 1 ff.) durchgeführte Reihenummessung referenziert. Damit sind die Mess- und Analyseergebnisse zu einer ergonomischen Auslegung auf Grundlage der deutschen Lkw-Fahrerpopulation geeignet. Die Merkmale der Stichprobenszusammensetzung sind bei der Beurteilung der Übertragbarkeit auf andere Populationen zu berücksichtigen.

Für den Feldversuch wurden drei fernverkehrstypische Fahrzeugvarianten (Faktor C) ausgewählt. Sie repräsentieren die wichtigsten Nutzfahrzeuge im schweren Güterfernverkehr (vgl. Kapitel 3.1.3; Braun & Kolb 2008 S. 31 ff.; Brähler 2010 S. 111 ff.; Shell 2010 S. 19 f.). Durch die Wahl der Sichtsituationen (Faktor D) und der Versuchsstrecke wurde ebenfalls die Fahrstreckenzusammensetzung der Fernverkehrsanwendung nachgebildet (vgl. Kapitel 3.1.4 und Kapitel 3.3.4; BAG 2011; BAG 2012; KBA 2011; KBA 2012; Isella 2012 S. 52 f.; Bothe et al. 2013b S. 295). Da sich Fernverkehrsfahrzeuge von anderen Nutzfahrzeugen oder Personenkraftwagen durch ihre konzeptionellen Abmessungen, die Sichteinschränkungen und ihr Fahrverhalten unterscheiden (vgl. Kapitel 1.1.1 und Kapitel 2.1.3), muss die Einschränkung auf die betrachteten fernverkehrstypischen Fahrzeuge bei der Übertragung der Erkenntnisse auf andere Fahrzeugvarianten oder Nutzungsumfänge beachtet werden.

Die Versuchsdauer wurde konzeptbedingt auf vier Stunden mit ca. 45 min zur Eingewöhnung und ca. 165 min zur Datenaufzeichnung begrenzt (vgl. Kapitel 3.3.3). Damit können Langzeiteinflüsse nicht vollständig berücksichtigt werden, es ist jedoch aufgrund der ausführlichen Eingewöhnungsphase und umfangreichen Aufzeichnungsphase mit realistischem Sichtverhalten während der Datenerhebung zu rechnen. Effekte der fahrerinitiierten Veränderung der Körperhaltung aufgrund von Ermüdungserscheinungen können mit den erhobenen Daten nicht untersucht werden.

Die Messdaten wurden im Zeitraum zwischen 6:00 und 19:00 Uhr über fünf Monate hinweg erhoben (vgl. Kapitel 3.3.5). Dadurch werden alle Zustände der Lichtverhältnisse bei Helligkeit berücksichtigt. Die Sichtinteraktion zwischen Fahrer, Spiegelsystem und Fahrzeugumgebung während der Nachtfahrt, die sich ggf. im Vergleich zur Tagnutzung aufgrund differenter Sichtzielprioritäten unterscheidet, kann mit den erhobenen Daten nicht beurteilt werden.

Die dynamischen Sichtdaten wurden mit fahrzeugfesten optischen Messsystemen (vgl. Kapitel 3.4.1) während fernverkehrstypischer Sichtsituationen aufgezeichnet (vgl. Kapitel 3.5.2). Aufgrund der ortsfesten Platzierung der Messsysteme innerhalb des Fahrerhauses (vgl. Kapitel 3.4.2) und nicht am Fahrerkopf, können exakte Sichtdaten mit minimaler Beeinflussung des Probanden aufgezeichnet werden. Das Datenaufzeichnungsvolumen ist aufgrund dieser Messtechnikintegration jedoch begrenzt. Extreme Kopfbewegungen oder -drehungen können mit einem solchen System nicht erfasst werden. Bei der Anwendung und Analyse der aufgezeichneten Sichtdaten ist daher die Qualität und Verfügbarkeit der Messwerte besonders zu beachten. Diese Kennwerte sind in Kapitel 4.1.1 situationsabhängig (Faktor D) für jede Fahrzeugvariante (Faktor C) dargestellt.

---

### 5.2.2 Datenaufbereitung und -analyse

---

Bei der Datenaufbereitung wurden aufgrund der geringen Datenverfügbarkeit die erhobenen Messdaten der Rangiersituationen aussortiert und nicht zur Datenanalyse herangezogen (vgl. Kapitel 4.1.1). Damit beinhalten die dynamischen Augpunktlagenverteilungen (vgl. Kapitel 4.2) und Sichtbereiche (vgl. Kapitel 4.4) keine auf der Auswertung von Rangiersituationen beruhenden Informationen. Bei der ergonomischen Auslegung der Verschiebekennlinie sollten jedoch auch große Knickwinkel, die nicht bei den nutzfahrzeugspezifischen Fahrscenarien sondern nur während der Rangiersituationen auftreten, berücksichtigt werden. Dazu wird die Position der sichtrelevanten Aufliegerkanten (vgl. Kapitel 4.5.2; Bothe et al. 2013b S. 298 ff.; Zaindl et al. 2013 S. 3 ff.) herangezogen. Die Annahme der Abhängigkeit der benötigten Sichtbereiche von den sichtrelevanten Aufliegerkanten ist für große Knickwinkel durch Probandenuntersuchungen abzusichern. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind bei der Beurteilung der Verschiebekennlinienverläufe bei  $KW < -40^\circ$  und  $KW > 40^\circ$  zu berücksichtigen.

Die dynamischen Augpunktlagen und Sichtstrahlorientierungen wurden im Versuchsfahrzeug mit einer Abtastfrequenz von 60 Hz erfasst, mit einer Baud-Rate von 500 kB über den CAN-Bus zum Datenlogger geschickt und dort kontinuierlich aufgezeichnet (vgl. Abbildung 5-1). Während der Datenaufbereitung wurden die aufgezeichneten Daten mit einer Abtastrate von 10 Hz ausgewertet und dadurch die über 1,7 Millionen analysierten Datensätze erzeugt.



Abbildung 5-1: Schritte der Datenaufzeichnung und -konvertierung

In dieser Arbeit wurden ausschließlich auf Fixationen, die während der Fahraufgabe eine durchschnittliche Dauer von 300 bis 400 ms aufweisen (vgl. Karsh & Breitenbach 1983 S. 53 ff.; Schweigert 2002 S. 84 ff.), basierende Augpunktlagen und Sichtstrahlorientierungen ausgewertet. Mit der Abtastrate von 10 Hz kann sichergestellt werden, dass alle aufgezeichneten Fixationen auch ausgewertet werden können. Durch die Wahl der im Vergleich zur Erfassungsrate reduzierten Auswertungsrate wird der innerhalb der Analyse zu untersuchende Datenumfang um den Faktor 6 verringert. Informationen während sakkadischer Blicksprünge oder über die Länge von Blickverweildauern können mit dieser Auswertungsrate nicht ausreichend aufgelöst werden. Sind diese Informationen für weitere Analysen von Interesse, können ausgewählte Umfänge der aufgezeichneten Rohdaten mit höheren Abtastraten ausgewertet werden.

Die Analyse der erhobenen Daten wurde mit ausreichendem Stichprobenumfang ( $N = 152$ ) anhand der in Kapitel 4.2 und Kapitel 4.3 beschriebenen statistischen Testmethoden ausgewertet. Die p-Werte der insgesamt 52 auf die Gesamt- oder Teilstichproben angewendeten Tests zur Überprüfung der aufgestellten Hypothesen, wurden durch Anwendung des von Hochberg (1988 S. 800 ff.) vorgeschlagenen Verfahrens korrigiert. Dies ist notwendig um den Effekt der zufälligen Signifikanz bei hohen, auf einer einzelnen Stichprobe basierenden, Testumfängen zu minimieren. Die fünf explorativ durchgeführten Tests wurden gesondert mit dem Verfahren von Hochberg korrigiert. Sollten auf Grundlage der erhobenen Datenbasis weitere Tests durchgeführt werden, ist auf eine entsprechende Korrektur der p-Werte zu achten.

Die Berechnung der FOV-Winkel zur Definition der dynamischen Sichtbereiche (vgl. Kapitel 4.4) ist aufgrund der vorausgegangenen Mess- und Auswertungsschritte mit einem sich fortpflanzenden Fehler behaftet. So fließen die Messungenauigkeit bei der Erfassung der probandenindividuellen statischen Spiegeleinstellungen und der Aufzeichnung der dynamischen Sichtdaten in die resultierende Fehlervarianz mit ein. Auch das Modell zur Knickwinkelberechnung liefert erst nach einer definierten Fahrtstrecke exakte Werte. Die anfallenden Fehler werden durch die in Kapitel 4.4.2 dargestellte Fehlervarianz bei der Analyse der Daten berücksichtigt. Für die ergonomische Umsetzung von Verschiebekennlinien eines Kamera-Monitor-Systems (KMS) ist eine Fehlervarianz von  $\pm 2^\circ$  bei einer Sichtbereichsbreite von über  $35^\circ$  akzeptabel. Sollen die berechneten Daten für Systeme mit höheren Anforderungen an die FOV-Winkel-Validität eingesetzt werden, muss die Fehlervarianz mit Blick auf den Anwendungsfall neu bewertet werden.



## 5.3 Übertragbarkeit der Erkenntnisse in eine Methode

Die Erkenntnisse die bei der Durchführung dieser empirischen Studie gewonnen wurden, können als Grundlage zur Erarbeitung einer systematischen Methode zur Analyse dynamischer Sichtsituationen eingesetzt werden. In diesem Kapitel werden Möglichkeiten der Anwendung und Einbindung in den ergonomischen Entwicklungsprozess einer solchen Methode skizziert.

### 5.3.1 Durchführungsschritte und systematische Anwendung

Die Schritte zur methodischen Durchführung der Analyse dynamischer Sichtsituationen sind in Abbildung 5-2 zusammengefasst. Sie sind an die Struktur dieser Arbeit angelehnt, können jedoch zur allgemeinen Analyse dynamischer Sichtdaten herangezogen werden. Mit dieser Methode kann beispielsweise auch das Kombiinstrument eines Sportwagens ergonomisch ausgelegt werden.

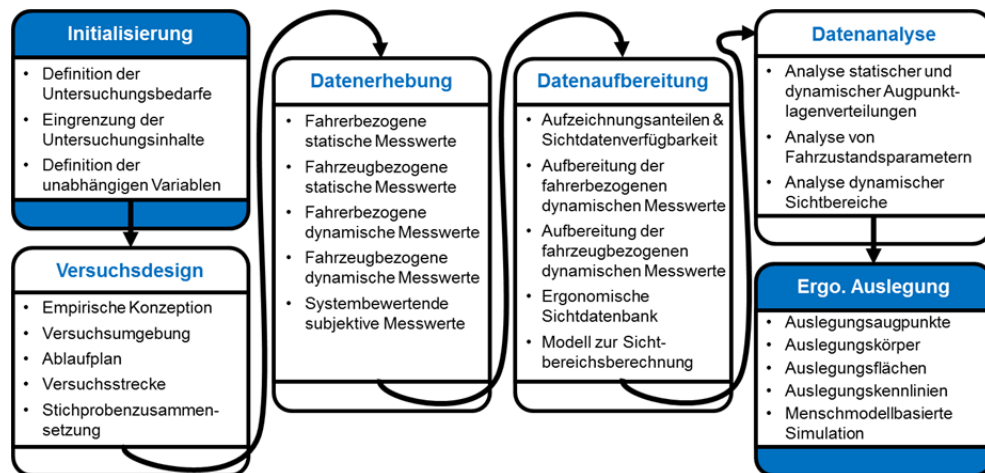


Abbildung 5-2: Schritte zur systematischen Durchführung der Methode (Bothe et al. 2013c S. 15)

Zur Initialisierung der Analyse werden die Untersuchungsbedarfe definiert, die Inhalte eingegrenzt und die unabhängigen Variablen bestimmt. Im zweiten Schritt wird das Versuchsdesign aufgestellt. Es folgt die Datenerhebung und -aufbereitung. Innerhalb der Datenanalyse werden die grundlegenden Kennwerte zur ergonomischen Auslegung der Komponenten ermittelt. Dazu findet zunächst eine anwendungsorientierte Datenauswahl statt (vgl. Abbildung 5-3).

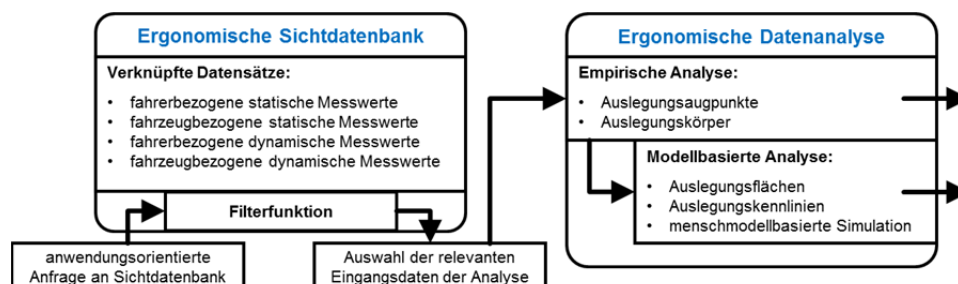


Abbildung 5-3: Anwendungsorientierte Datenauswahl und ergonomische Datenanalyse (Bothe et al. 2013c S. 16)

Zur Analyse der dynamischen Sichtbereiche des KMS wurden beispielsweise nur Sichtdaten der Spiegelblicke ausgewählt. Nach der empirischen Analyse können Auslegungsaupunkte und -körper direkt zur ergonomischen Gestaltung herangezogen werden. Am Beispiel des KMS sind dies der Augellipsoid und dessen Mittelpunkt. Um Auslegungsflächen oder -kennlinien zu erzeugen werden weitere Berechnungsmodelle verwendet. Beim KMS wurde das Modell zur Sichtbereichsberechnung eingesetzt. Innerhalb der ergonomischen Auslegung können die dynamischen Sichtdaten zur menschmodellbasierten Haltungs- und Sichtsimation herangezogen werden. Exemplarisch ist hier die Berechnung von wahrscheinlichen Fahrhaltungen auf Grundlage der dynamischen Augpunktlagenverteilungen und Sichtstrahlorientierungen zu nennen.

### 5.3.2 Einbindung in den ergonomischen Auslegungs- und Absicherungsprozess

Die Analyse dynamischer Sichtssituationen kann in den ergonomischen Auslegungs- und Absicherungsprozess (vgl. Kapitel 2.2.1; Bothe 2010b S. 30; Bothe et al. 2013c S. 18) integriert werden. Die am Vorgängerfahrzeug oder einem Konzepterprober erhobenen dynamischen Sichtdaten sind die Grundlage zur Definition der Ergonomieziele zum Meilenstein 1 (vgl. Abbildung 5-4). Zu den weiteren Prozessschritten finden CAD-basierte Simulationen auf Basis der ergonomischen Sichtdatenbank statt. Sobald ein fahrtüchtiges Prototypenfahrzeug vorhanden ist, kann die Datenbank mit den im neuen Fahrzeug erhobenen dynamischen Sichtdaten aktualisiert werden (vgl. Abbildung 5-5). Zum Abschluss der Absicherung wird mit dem Serienfahrzeug im Feldversuch eine komplette Analyse der dynamischen Sichtssituationen durchgeführt. Damit kann die Qualität der vorangegangenen Simulationen überprüft und verbessert werden. Die Sichtdatenbank wird mit der finalen Datenerhebung zur Auslegung des Nachfolgerfahrzeugs auf den neuesten Stand gebracht.

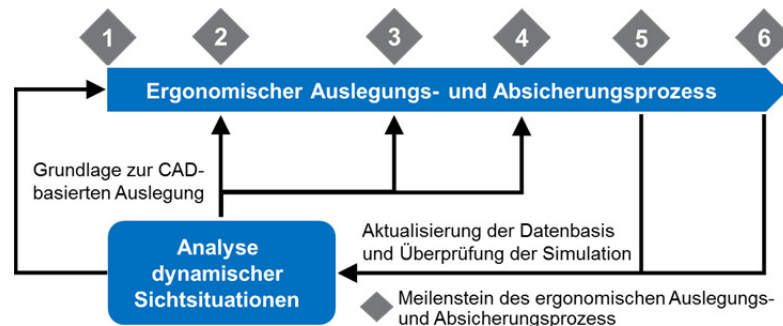


Abbildung 5-4: Prozessschrittabhängige Anwendung der Analyse (Bothe et al. 2013c S. 18)

Die vorgeschlagene Methode ist ebenfalls in die ergonomische Bewertungssystematik (vgl. Kapitel 2.2.1; Bothe 2010b S. 32 ff.; Bothe et al. 2013c S. 19) einzubinden. Innerhalb des prozessbegleitenden Prüf- und Dokumentationswerkzeugs (vgl. Abbildung 5-5) können zur Modellabsicherung Simulationen mit den in dieser Arbeit entwickelten Berechnungsmodellen durchgeführt werden. Die Grundlage zur CAD-basierten Auslegung ist mit der ergonomischen Sichtdatenbank gegeben. Die Datenerhebung und -analyse wird in die Bewertungssystematik integriert.

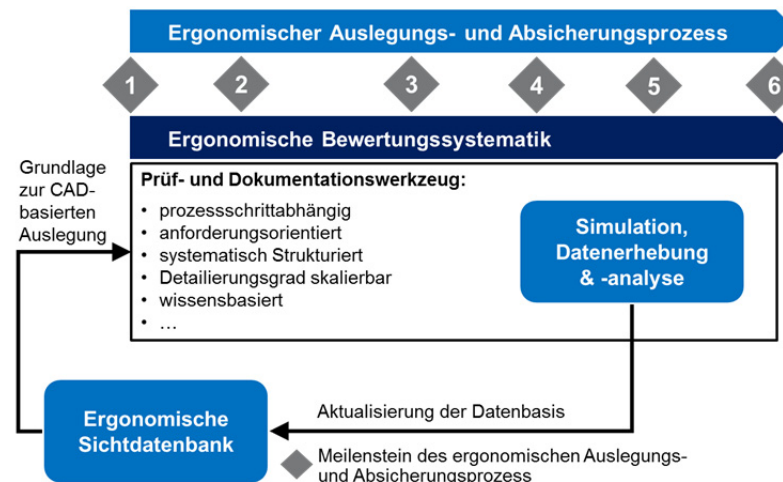


Abbildung 5-5: Einbindung der Analyse in die ergo. Bewertungssystematik (Bothe et al. 2013c S. 19)

Durch die vorgeschlagene Methode kann die Analyse dynamischer Sichtssituationen als integraler Bestandteil des ergonomischen Auslegungs- und Absicherungsprozess etabliert werden. Durch die fortlaufende Anwendung über mehrere Fahrzeuggenerationen und -varianten hinweg wird die Analyse effektiver gestaltet und noch besser an den Entwicklungsprozess adaptiert (vgl. Bothe et al. 2013c S. 20). Es wird eine Wissensbasis über die prozessabhängige Anpassung der Konzeptdaten und die finale Umsetzung von Auslegungselementen im Serienfahrzeug aufgebaut. Dieses Wissen wird in der Bewertungssystematik dokumentiert und kann damit direkt in die auf dynamischen Sichtdaten basierenden Simulationsvorgaben einfließen.

## 6 Schlussfolgerung und Ausblick

### 6.1 Schlussfolgerung für die Wissenschaft

Nach der Auswertung der statischen und dynamischen Sichtdaten kann festgestellt werden, dass die ergonomische Analyse der dynamischen Sichtinteraktion während der Fahraufgabe auf Messdaten der dynamischen Augpunktlagenverteilung und Sichtstrahlorientierung beruhen muss. Die statischen Augpunktlagenverteilungen sind nicht geeignet, die reale Nutzung des Fahrzeugs zu beschreiben. Sie repräsentieren weder die mittleren realen Augpunktlagen noch die real auftretenden Streubreiten der Augpunktlagenverteilungen. In Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2 sind die Verteilungen der statischen und dynamischen probandenindividuellen Mittelwerte in Seitenansicht und Draufsicht dargestellt.

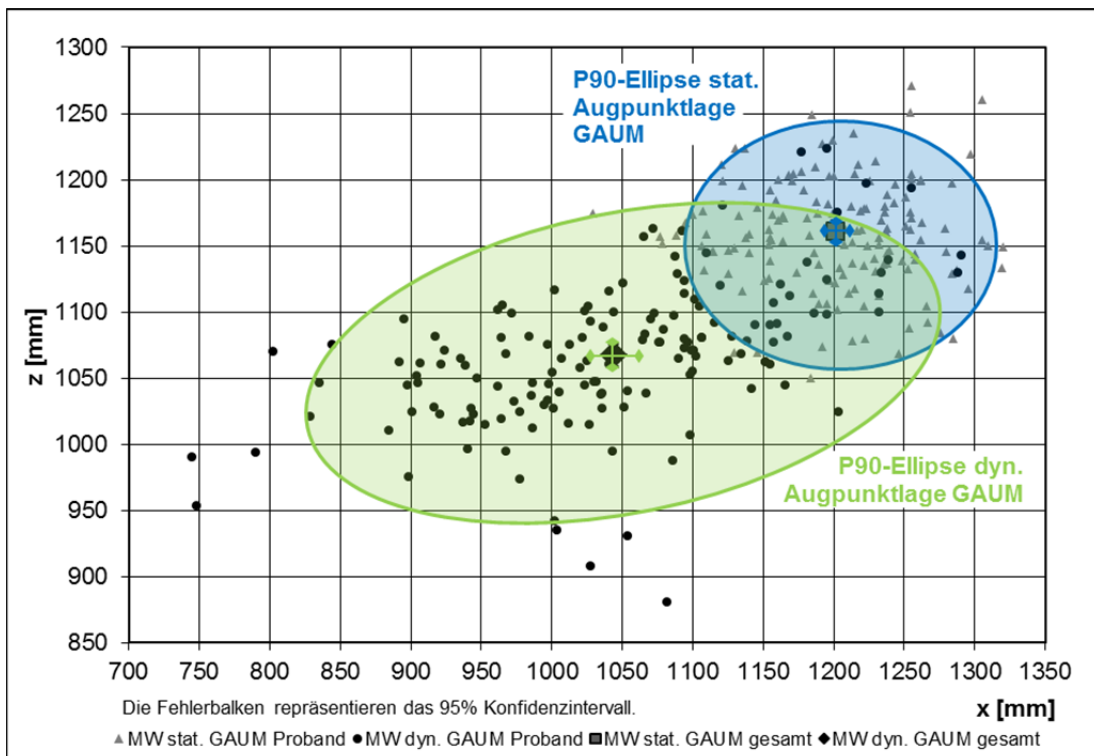


Abbildung 6-1: Statische und dynamische Augpunktlagenverteilung (V1-V3; N = 152) Seitenansicht

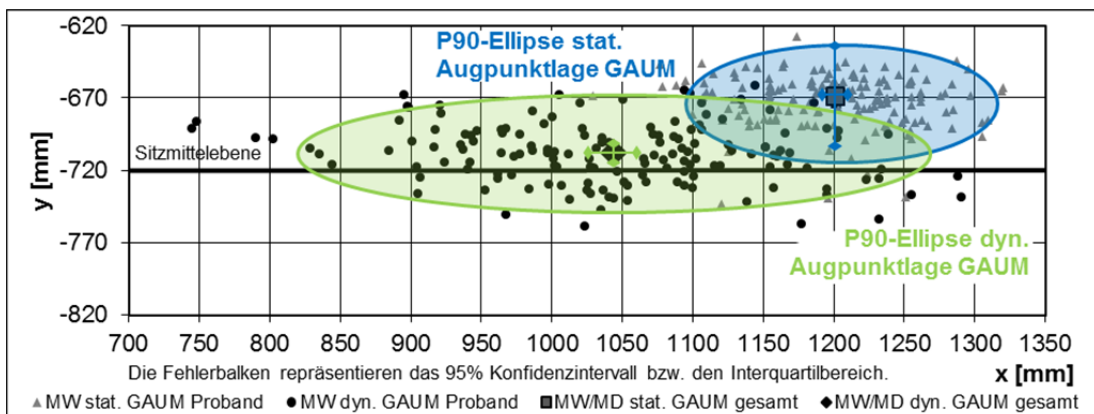


Abbildung 6-2: Statische und dynamische Augpunktlagenverteilung (V1-V3; N = 152) Draufsicht

Durch die vorgestellte Datenerhebung liegen neben den dynamischen Sichtdaten eine Vielzahl an dynamischen Fahrzustandsdaten, sowie statischer fahrer- und fahrzeugbezogener Messwerte vor. Die dynamischen Augpunktlagen und Sichtstrahlorientierungen können anhand der Zusatzinformationen gezielt ausgewählt und analysiert werden (vgl. Abbildung 6-4). Durch eine auswertungsorientierte

Selektion wird die Aussagekraft der auf die betrachteten Teilmengen angewendeten statistischen Testverfahren geschärft. Innerhalb der Analyse können unter Variation der Faktorstufen Relativvergleiche zwischen Teilgruppen durchgeführt und damit Erkenntnisse über die hervorgerufenen Abhängigkeiten gewonnen werden (vgl. Kapitel 4.2). Durch die Analyseergebnisse (vgl. Kapitel 5.1) konnten bereits grundlegende Zusammenhänge der dynamischen Sichtinteraktion zwischen Fahrer, Spiegelsystem und Fahrzeugumgebung nachgewiesen werden. Die erhobenen und in der ergonomischen Sichtdatenbank abgelegten Datensätze können auch zur Beantwortung weiterer Fragestellungen zielgerichtet untersucht werden.

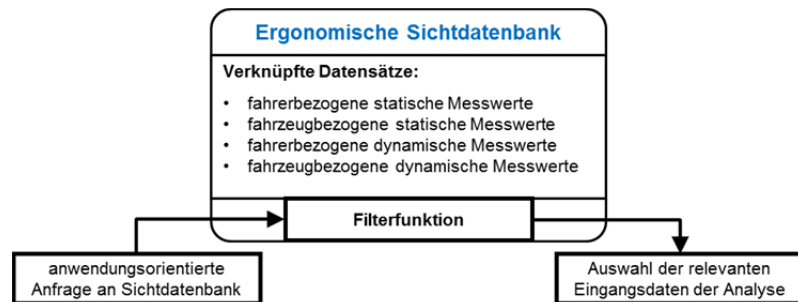


Abbildung 6-3: Funktionsprinzip der ergonomischen Sichtdatenbank (Bothe et al. 2013c S. 16)

Mit der Analyse dynamischer Sichtsituationen (vgl. Abbildung 6-4) wurde ein systematischer Ablauf zur Erhebung, Untersuchung und Anwendung von Informationen über die dynamische Sichtinteraktion vorgestellt (vgl. Kapitel 5.3). Dieses Vorgehen führt durch die Erhöhung des aufgezeichneten Datenumfangs und die Verknüpfungen innerhalb der Datensätze zur Möglichkeit der anwendungsorientierten Auswertung des realen Sichtverhaltens während der dynamischen Nutzung von Sichtsystemen. Damit unterscheidet sich die vorgestellte Vorgehensweise im verarbeiteten Datenumfang und erzielten Detaillierungsgrad maßgeblich von den bekannten Werkzeugen der ergonomischen Auslegung und Absicherung. Der datenbankbasierte Zugriff und die modellbasierte automatisierte Auswertung ermöglichen diese hochauflösende Datenanalyse. Durch die Möglichkeit der Übertragbarkeit der Erkenntnisse in eine Methode wird der Weg zur systematischen Anwendung der Ergebnisse in weiteren Bereichen der ergonomischen Gestaltung sowie der Integration in den Fahrzeugentwicklungsprozess aufgezeigt.

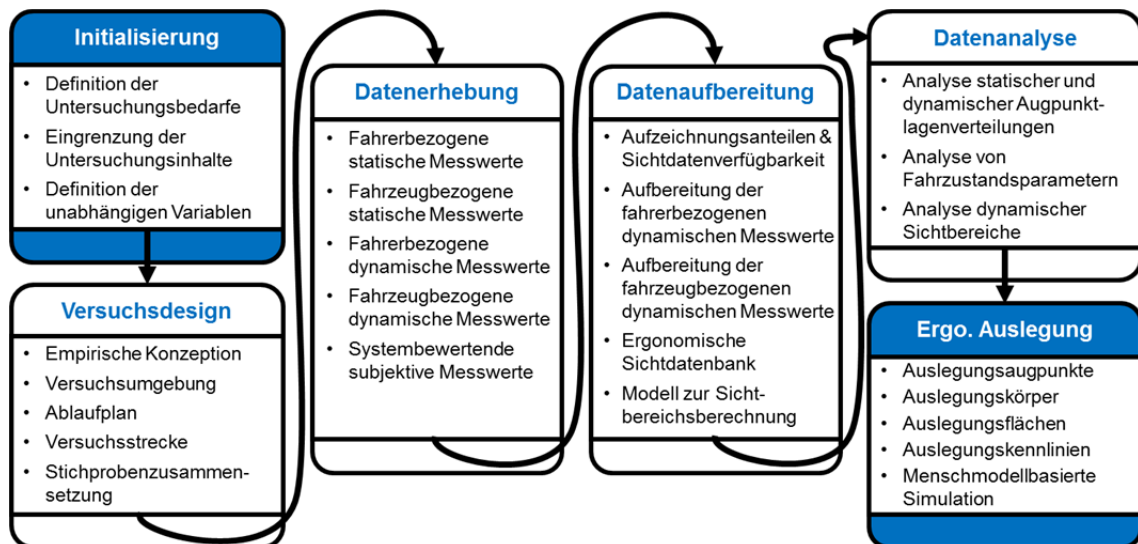


Abbildung 6-4: Analyse dynamischer Sichtsituationen (Bothe et al. 2013c S. 15)

Durch die Analyse der Zusammenhänge zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit, Knickwinkel und Sichtsituation konnten Erkenntnisse über Abhängigkeiten dieser drei Kenngrößen innerhalb eines realen dynamischen Nutzungsszenarios gewonnen werden. Es wurde die geschwindigkeitsabhängige Beschränkung der maximal auftretenden Knickwinkel (vgl. Abbildung 6-5) und die Abhängigkeit der dynamischen Augpunktlagen von diesen Knickwinkeln (vgl. Abbildung 6-6) gezeigt. Diese Erkenntnisse können zur Verbesserung der realitätsnahen Darstellung von Nutzungsszenarien beispielsweise in Fahrsimulationen ihre Anwendung finden.



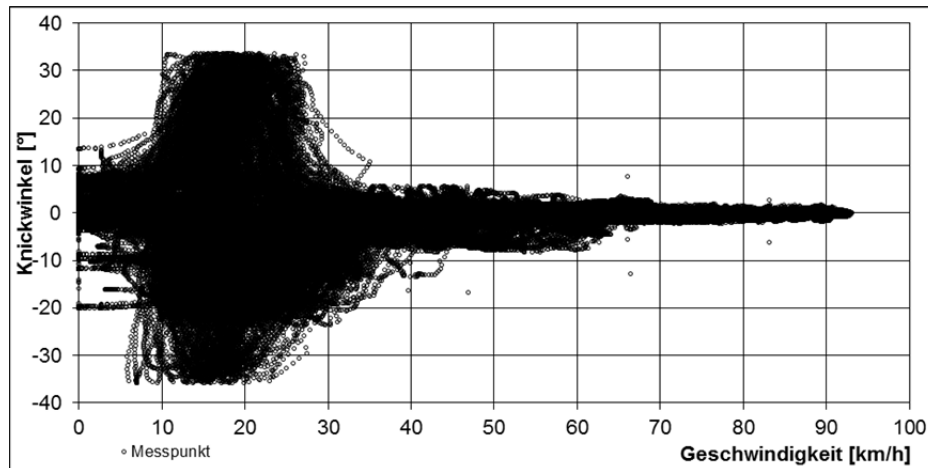


Abbildung 6-5: Geschwindigkeitsabhängige Knickwinkelverteilung V2 n = 624.120

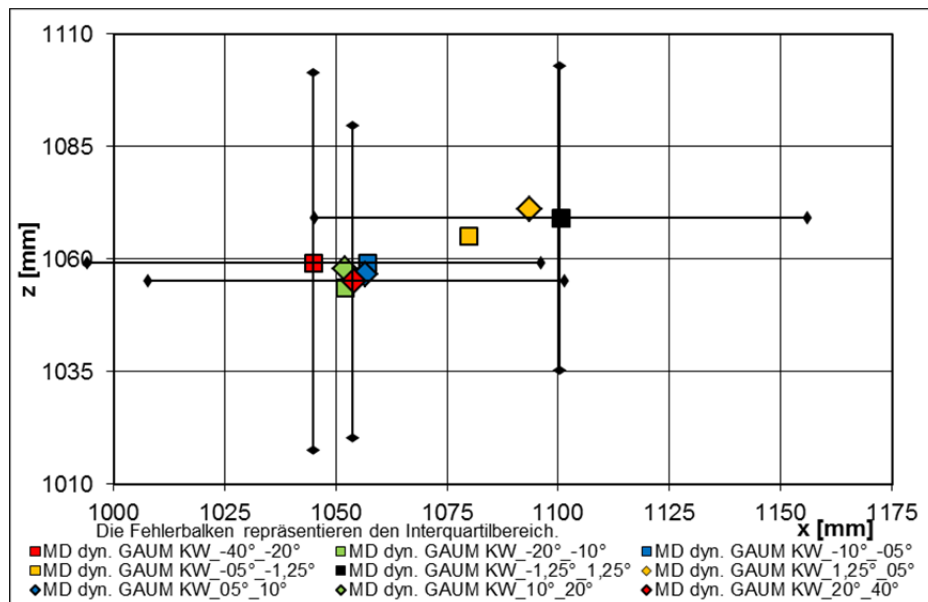


Abbildung 6-6: Knickwinkelabhängigkeit der dynamischen Augpunktlagen V2 n = 46 Seitenansicht

Die vorgestellten Erkenntnisse belegen, dass dynamische Vorgänge im Fahrzeug auf Basis der während dynamischer Fahrsituationen erhobenen Messdaten analysiert werden müssen. Simulationen, die die reale Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Interaktion berücksichtigen sollen, müssen auf Grundlage der Analyse dynamischer Sichtdaten entwickelt, validiert und durchgeführt werden. Im Fall der Sichtinteraktion sind dies dynamische Augpunktlagen, Sichtstrahlorientierungen und abgeleitete Sichtziele. Durch eine Berücksichtigung der Fahrdynamikeinflüsse kann eine Simulation der gewonnenen Erkenntnisse noch realistischer gestaltet werden.

Die Optimierung der menschenmodellbasierten Sicht- und Haltungssimulation auf Basis dynamischer Sichtdaten stellt einen aufgezeigten Forschungsbedarf dar. Die innerhalb dieser Arbeit erhobenen Daten können im ersten Schritt zur systematischen Verbesserung der wahrscheinkeitsbasierten Haltungsberechnung eingesetzt werden. Durch weitere Analysen des zeitkontinuierlichen dynamischen Sichtverhaltens können Algorithmen zur realitätsnahen Simulation von Bewegungsvorgängen, die eine Blickrichtungs- und Körperhaltungsveränderung berücksichtigen, abgeleitet werden. Neben den Sichtdaten können zur Simulation der gesamten Fahrer-Fahrzeuginteraktion auch weitere Körperpunkte dynamisch erfasst werden (vgl. Zaindl et al. 2014 S. 2). Damit ist die Ableitung von menschenmodellbasierten Simulationen von Bewegungsvorgängen auf Grundlage dynamischer realer Fahrhaltungsdaten möglich. Die gewonnenen Erkenntnisse werden zur Ableitung von Bewegungstrajektorien und zur Definition des dafür notwendigen Raumbedarfs eingesetzt. Durch dieses Vorgehen werden die Simulationsalgorithmen verbessert. Damit kann eine realitätsnahe Bewegungssimulation zur ergonomischen Absicherung bereitgestellt werden.

## 6.2 Schlussfolgerung für die Praxis

Neben den technischen und regulativen Vorgaben (vgl. ISO/FDIS 16505 2014 S. 1 ff.) müssen auch die Aspekte der ergonomischen Gestaltung bei der Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) zum Ersatz der konventionellen Spiegelsysteme berücksichtigt werden. Die Erkenntnisse aus der Analyse dynamischer Sichtsituationen sollten in die ergonomische Auslegung von KMS einfließen. Insbesondere sind hier die dreidimensionale Verteilung der dynamischen Augpunktlagen, repräsentiert durch den Augellipsoid, zur Positionierung und Ausrichtung der Monitore, sowie die Beschreibung der dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht, definiert durch die Sichtbereichswinkel, zur Ableitung einer Verschiebekennlinie des dargestellten Sichtbereichs (vgl. Abbildung 6-7) zu nennen.

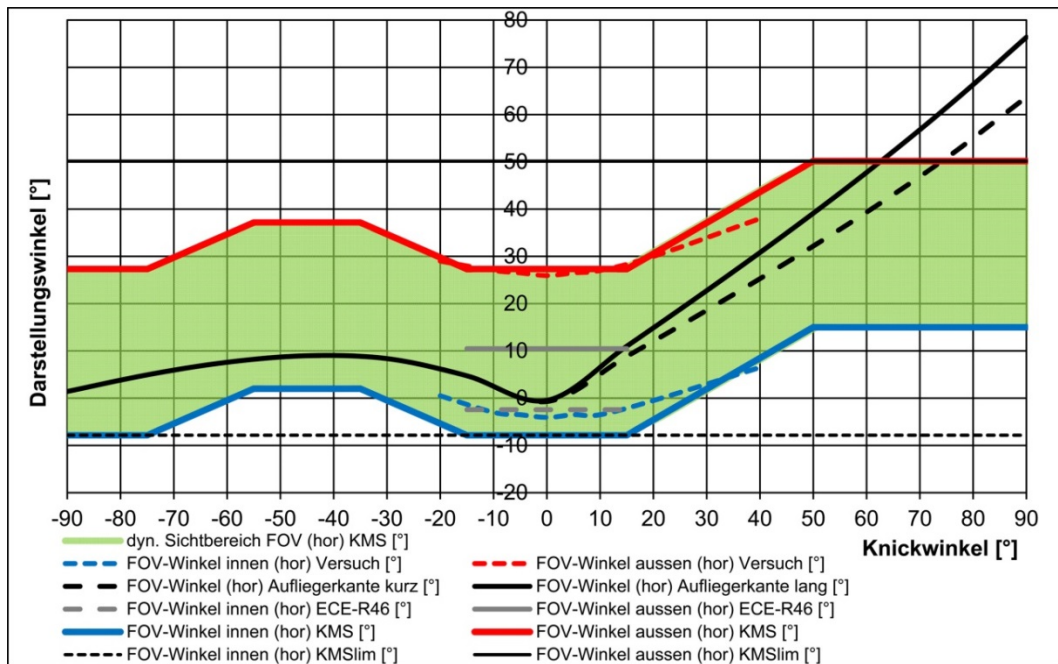


Abbildung 6-7: Horizontale Verschiebekennlinien des KMS Klasse II Fahrerseite

Die vorgeschlagene Methode der Analyse dynamischer Sichtsituationen sollte über den gesamten Fahrzeugentwicklungsprozess ihre Anwendung finden. Die Einbindung in den Gesamtprozess ist in Abbildung 6-8 dargestellt.

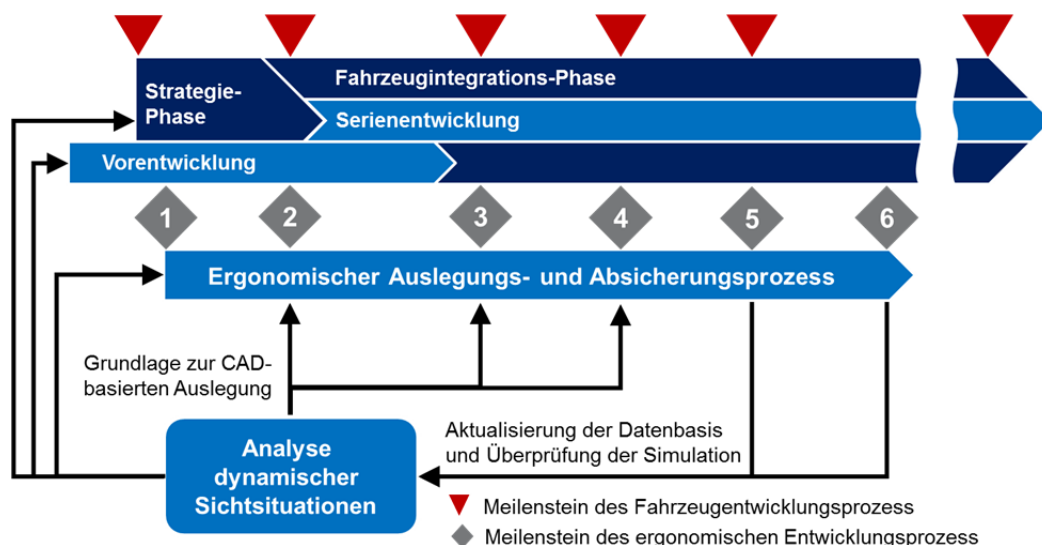


Abbildung 6-8: Einbindung der Analyse dynamischer Sichtsituationen in den Fahrzeugentwicklungsprozess (Bothe et al. 2013c S. 18)

Die Mess- und Analyseergebnisse sollten neben dem Einsatz im ergonomischen Auslegungs- und Absicherungsprozess auch zum Beginn der Vorentwicklungsprozesse und der Strategie-Phase, sowie zu den folgenden Meilensteinen der Modellabsicherung eingesetzt werden. Damit ist eine Systementwicklung, an der in der Praxis mehrere Bereiche eines Fahrzeugherstellers beteiligt sind, auf der einheitlichen Grundlage von realitätsnahen dynamischen Sichtdaten möglich.

Die in dieser Arbeit beschriebene Versuchsdurchführung und -analyse ist mit einem sehr hohen Aufwand verbunden und kann daher nicht bei jeder Fahrzeugvariante und zu jeder entwicklungs-schrittabhängigen Systemanpassung durchgeführt werden. Der Aufwand zur Messung und Auswertung statischer Augpunktlagen ist deutlich geringer und die Methode der Erfassung statischer Sichtdaten ist bereits im ergonomischen Entwicklungsprozess etabliert. Daher ist in der Praxis damit zu rechnen, dass die Analyse dynamischer Sichtsituationen nicht so oft wie eine Auswertung von statischen Augpunktlagen durchgeführt werden wird.

Wie durch die vorgestellte Analyse gezeigt wurde, unterscheiden sich statische und dynamische Augpunktlagenverteilungen maßgeblich voneinander. Die statischen Augpunktlagen können nicht die reale Nutzung des Fahrzeugs repräsentieren. Daher wird zur vereinfachten Anwendung in der Praxis, bei der lediglich Informationen über eine realitätsnahe statische Sitzhaltung benötigt werden, eine offsetbasierte Korrektur der gemessenen statischen Augpunktlagen vorgeschlagen. Die statischen Messwerte werden auf Basis der Analysen im KKOS in x-Richtung um 157,39 mm nach vorne, in y-Richtung um 39,33 mm nach links und in z-Richtung um 94,36 mm nach unten korrigiert (vgl. Kapitel 4.2.1). Der Vergleich der x-Koordinate der statischen Augpunktlagen, vor und nach der durchgeführten Korrektur, sowie der dynamischen Augpunktlagen ist in Abbildung 6-9 dargestellt.

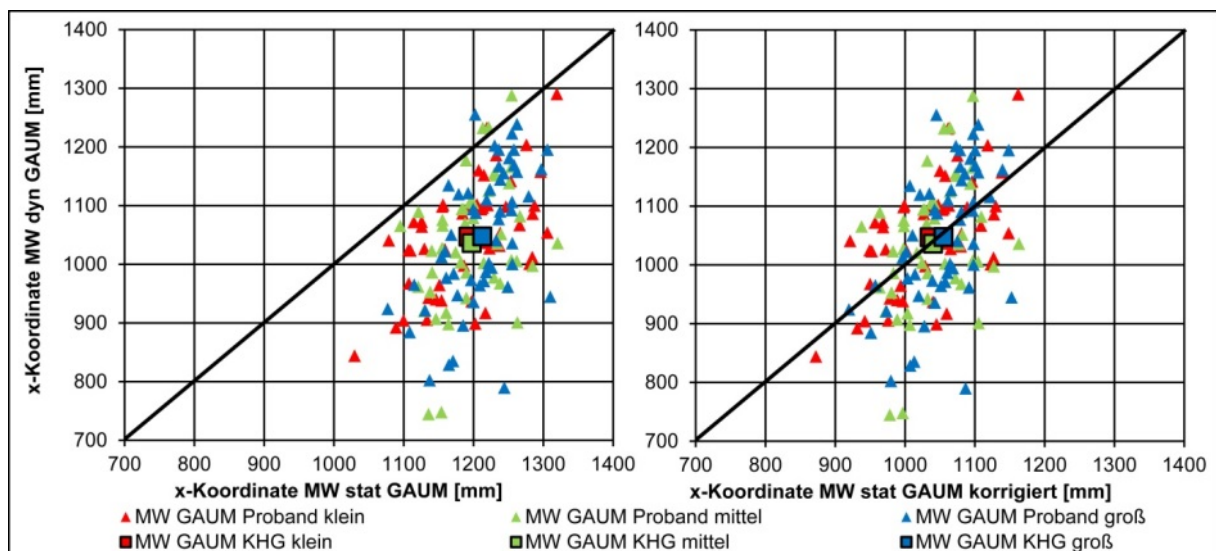


Abbildung 6-9: Korrektur der statischen Augpunktlagen durch Offsetverschiebung

Durch die Korrektur der teilgruppenindividuellen Mittelwerte statischer Augpunktlagen können diese an die Werte der realitätsnahen dynamischen Augpunktlagen angepasst werden. Die Streubreitenunterschiede werden durch die Offsetverschiebung jedoch nicht korrigiert. Die Analyse dynamischer Augpunktlagen kann durch die vorgeschlagene Korrektur nicht ersetzt werden. Insbesondere zur ergonomischen Auslegung der Sichtinteraktion zwischen Fahrer und Fahrzeug müssen während dynamischer Nutzungsszenarien erhobene Daten herangezogen werden.

### 6.3 Ausblick für weitere Arbeiten

Folgende Arbeiten sollten im Umfeld der Analyse dynamischer Sichtsituationen zur Bestimmung der dynamischen Sichtbereiche weiterer Fahrzeugkomponenten mit hoher Sichtrelevanz durchgeführt werden. Hier sind insbesondere Kombiinstrumente, die sich in aktuellen Fahrzeugkonzepten zu freiprogrammierbaren Anzeige- und Interaktionsmodulen entwickeln, von Interesse. Durch diesen Entwicklungstrend sind die Anzeigen nicht mehr ortsgebunden, sondern können situationsabhängig an unterschiedlichen Positionen der Darstellungsfläche angeordnet werden. Ein weiterer Trend der in

der Fahrzeugentwicklung beobachtet werden kann ist, dass die Displayflächen immer größer, die Lenkraddurchmesser dagegen immer kleiner werden (vgl. Glauner 2006 S. 3 ff.). Die Fahrer blicken aus unterschiedlichen Augpunktlagen durch das Lenkrad auf das Kombiinstrument (vgl. Glauner 2006 S. 15; SAE J1050 2009 S. 19 ff.; Bothe 2010b S. 61 ff.). Dadurch entstehen Sichtbereiche auf dem Display, die aufgrund der Verdeckung durch das Lenkrad (Lenkradschatten) nicht zu jedem Zeitpunkt der dynamischen Nutzung eingesehen werden können.

Es wurden mehrere Modelle, die die Visualisierung und Bewertung der verfügbaren Sichtbereiche der Anzeigefläche auf Grundlage von statischen Augpunktlagen beschreiben (vgl. Abbildung 6-10; Glauner 2006 S. 28; Bothe 2010b S. 95 ff.; Isella 2012 S. 84 ff.), vorgestellt. Zur Erzeugung von ergonomischen Auslegungsfeldern ist eine realitätsnahe Datengrundlage notwendig. Nach einer anwendungsorientierten Analyse der erhobenen dynamischen Sichtdaten zur Auslegung von Kombiinstrumenten können die gewonnen Erkenntnisse mit Hilfe der vorgeschlagenen CAD-Modelle zur Ableitung von dynamischen situationsabhängigen Sichtbereichen auf der Anzeigefläche des Kombiinstrumentes verwendet werden. Damit können die hochpriorisierten Informations- und Warnmeldungen auf einem freiprogrammierbaren Kombiinstrument situationsabhängig so platziert werden, dass sie von den Fahrern während allen Fahrszenarien eingesehen werden können.

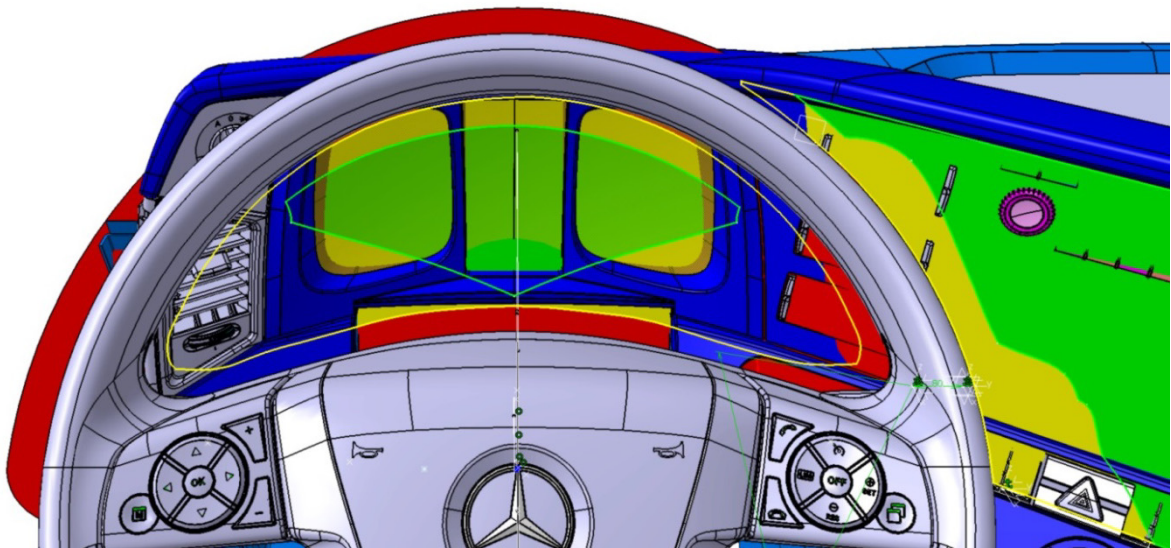


Abbildung 6-10: Modell zur Visualisierung und Bewertung der verfügbaren Sichtbereiche auf der Anzeigefläche eines Nutzfahrzeugs (Isella 2012 S. 94)

Die Optimierung der menschenmodellbasierten Sicht- und Haltungssimulation auf Basis dynamischer Sichtdaten stellt einen weiteren aufgezeigten Forschungsbedarf dar. Die innerhalb dieser Arbeit erhobenen und aufbereiteten Daten der Sichtinteraktion bilden die Grundlage zur Analyse weiterer relevanter Fragestellungen. Zur Berechnung und Validierung von menschenmodellbasierten Fahrhaltungssimulationen werden aktuell statische Augpunktlagenverteilungen herangezogen (vgl. Bothe 2010a S. 80 f.; Fröhmel 2010 S. 82 f.; Friedrichsen 2013 S. 48). Da die statischen Sichtdaten nicht die Nutzung während der realen Fahraufgabe repräsentieren, werden die Algorithmen zur Haltungswahrscheinlichkeitsberechnung mit ungeeigneten Daten optimiert. Durch die nutzungsorientierte Berücksichtigung dynamischer Sichtdaten können Menschmodelle zur ergonomischen Absicherung im Fahrzeug hingegen realitätsnah positioniert werden. Neben der Grundhaltung mit dem Blick nach vorne können Haltungsrepräsentanten der dynamischen Sicht in ausgewählte Sichtziele auf Realdaten basierend berechnet werden. Von diesen Haltungen können Restriktionen zur stärkeren Berücksichtigung des dynamischen Sichtverhaltens bei der simulierten Haltungsberechnung abgeleitet werden. Die Simulationsqualität wird dadurch verbessert. Werden mehrere zeitlich aufeinander folgende Datensätze der dynamischen Sicht berücksichtigt, sind realitätsnahe Bewegungssimulationen der Kopf- und Augenposition während der Blickinteraktion möglich.

Zur Erweiterung des Wissens über die konzeptabhängige Sichtinteraktion zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt sollten in zukünftigen Arbeiten die Sichtdaten in weiteren Nutzfahrzeugvarianten und unterschiedlichen Pkw-Modellen erhoben und analysiert werden. Damit können Erkenntnisse über den Einfluss der konzeptbedingten Proportionen und Sichtverdeckungen auf das dynamische Sichtverhalten der Fahrer innerhalb eines weiten Spektrums an Fahrzeugvarianten gesammelt werden.



---

## 7 Zusammenfassung

---

Das Nutzfahrzeug wird vom Fahrer zur Erfüllung der Transportaufgabe durch eine herausfordernde Verkehrsinfrastruktur bewegt. Die fahrerbezogenen Sichtthemen, insbesondere die indirekte Sicht zur Überwachung des Fahrzeugverhaltens, sind während dynamischer Sichtsituationen von besonderer Bedeutung. Die Hauptanforderungen des Spediteurs, der die Kaufentscheidung für ein neues Fahrzeug trifft, sind die kosteneffiziente, schnelle und flexible Bereitstellung von Transportgütern. Bei der Auslegung von Nutzfahrzeugen müssen beide Anforderungen berücksichtigt werden.

Aufgrund des Potentials zur Kraftstoff einsparung und den technologiebedingten Vorteilen für den Lkw-Fahrer besteht das Interesse konventionelle Spiegelsysteme eines Nutzfahrzeugs durch Kamera-Monitor-Systeme (KMS) zu ersetzen. Das elektronische Sichtsystem wird direkt in die dynamische Sichtinteraktion zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt eingebunden und muss daher nach ergonomischen Methoden ausgelegt werden. Dazu werden Informationen über das dynamische Sichtverhalten der Lkw-Fahrer während der Nutzung der konventionellen Spiegel benötigt. Zum einen sind dies die vom Fahrer zur Bewältigung der fernverkehrstypischen Transportaufgabe benötigten dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht. Zum anderen die dynamischen Augpunktlagenverteilungen, die die Fahrer während dynamischer Sichtsituationen einnehmen.

Die zur Analyse der dynamischen Sichtinteraktion notwendigen Rohdaten werden innerhalb eines Feldversuchs erhoben. Um während des Probandenversuchs repräsentative Sichtinformationen aufzeichnen zu können wird ein 4-faktorielles Versuchsdesign verwendet. Der Gesamtversuch wird in drei Einzelversuche mit unterschiedlichen Fernverkehrsfahrzeugen unterteilt. In jedem Einzelversuch werden die fernverkehrstypischen Sichtsituationen von den ausgewählten Probanden durchfahren. Dabei wird die Variation der Körperhöhe und des Taillenumfangs durch die Zusammenstellung des Probandenkollektivs berücksichtigt. Es werden statische und dynamische Sichtdaten aufgezeichnet, aufbereitet und innerhalb einer ergonomischen Sichtdatenbank für die Analyse bereitgestellt.

Durch die Analyse der statischen und dynamischen Augpunktlagenverteilungen wird festgestellt, dass sich die beiden Vergleichsgruppen sowohl in der Lage der Mittelwerte als auch in der Streubreite der Verteilung auslegungsrelevant unterscheiden. Nur die Verteilungen dynamischer Augpunktlagen und die zugehörigen Sichtstrahlorientierungen können das reale Nutzungsverhalten des bewegten Fahrzeugs repräsentieren. Daher müssen zur ergonomischen Gestaltung von Fahrzeugkomponenten, die in eine Sichtinteraktion eingebunden sind, dynamische Augpunktlagen herangezogen werden.

Es werden die Einflüsse der vier Faktoren auf die dynamischen Augpunktlagenverteilungen untersucht. Die Augpunktlagen kleiner und großer Probanden unterscheiden sich in Fahrzeughochrichtung. Es kann kein Einfluss des Taillenumfangs auf die Position der Augpunkte in Fahrzeuglängsrichtung nachgewiesen werden. Eine Abhängigkeit der Augpunktlage von der Fahrzeugvariante wird durch die Analyse bestätigt. Der Einfluss der Sichtsituation auf die Verteilung der Augpunktlagen wurde anhand der Häufigkeit von Spiegelblicken, sowie der mittleren Augpunktlage und Streubreite nachgewiesen. Daher ist bei der auf dynamischen Augpunktlagen basierenden ergonomischen Auslegung auf die nutzungsorientierte Gewichtung der einzelnen Sichtsituationen zu achten.

Der Knickwinkel wird als Prädiktor für das dynamische Sichtverhalten in schweren Nutzfahrzeugen identifiziert. Zur Bestimmung der dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht werden die Sichtdaten daher mit einem Modell zur Sichtbereichsberechnung knickwinkelabhängig ausgewertet. Es resultieren Sichtwinkelverläufe, die den genutzten dynamischen Sichtbereich der Lkw-Fahrer in den ausgewerteten Sichtsituationen repräsentieren. Es wird eine Abhängigkeit dieser Verläufe von den dynamischen Sichtsituationen nachgewiesen. Die untersuchten Versuchsfahrzeuge, die sich durch die Fahrerhausvariante nicht aber durch die Zugzusammensetzung unterscheiden, haben keinen Einfluss auf die genutzten Sichtbereiche. Fahrer mit unterschiedlichen Körperhöhen nutzten aus den individuellen Augpunktlagen dieselben dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht.

Die Erkenntnisse der Analyse dynamischer Sichtsituationen werden zur ergonomischen Auslegung eines KMS herangezogen. Die sichtwinkelabhängige Darstellungsqualität der Monitore wird durch deren Ausrichtung auf die dynamischen Augpunktlagen berücksichtigt. Die automatisierte Anpassung der dargestellten Sichtbereiche wird durch eine knickwinkelabhängige Verschiebekennlinie des KMS umgesetzt. Dadurch wird das neuartige Sichtsystem an die ergonomischen Anforderungen der Lkw-Fahrer angepasst. Die gewonnenen Erkenntnisse können zur ergonomischen Auslegung weiterer sichtrelevanter Systeme und zur Optimierung von Simulationen eingesetzt werden.

## Anhang

### A1 Veröffentlichungen zur Sichtdatenerhebung

Tabelle A-1: Veröffentlichungen zur Sichtdatenerhebung chronologisch aufgelistet

Jahr	Autoren	Titel	Schlagwörter
1946	Brues, A.M (U.S. Army Air Forces)	Movement of the Head and Eye in Sighting (Bericht)	Messung dynamischer Augpunktlagen und Sichtstrahlorientierungen
1965	Meldrum, James	Automobile driver eye position (SAE-Paper)	Messung statischer Augpunktlagen (→SAE J941 1965)
1965	SAE International	Motor Vehicle Drivers' Eye Locations (SAE Norm J941 1965)	Definition des Augellipsoid Version 1
1967	Yarbus, Alfred	Eye Movements and Vision (Buch)	Messung und Analyse von Blickbewegungen und Fixationen
1973	SAE International	Describing and Measuring the Driver's Field of View (SAE Norm J1050 1973)	Bewertung der direkten und indirekten Sicht basierend auf SAE J941
1978	Burandt, Ulrich	Ergonomie für Design und Entwicklung (Buch)	Maßkonzepte; Augpunktlagenverteilung
1995	Seidl, Andreas (TU München); Krist, Renate (KU Eichstätt); Geuß, Hartwich (TU München)	FAT-Schriftenreihe Nr. 123: RAMSIS – ein System zur Erhebung und Vermessung dreidimensionaler Körperhaltungen von Menschen zur ergonomischen Auslegung von Bedien- und Sitzplätzen im Auto (Dissertationen)	Messung statischer Augpunktlagen unter Sichtstrahlorientierung; Validierung; Haltungssimulation; Menschmodellmodellierung
1996	Partmann, Thomas; Reinig, Hans-Joachim; Struck Günther (Fraunhofer Institut für Informations- und Datenverarbeitung, Karlsruhe)	FAT- Schriftenreihe Nr. 127: Blickbewegungsmessung als Werkzeug für die Gestaltung und Bewertung von bord- und straßenseitigen Informationssystemen für den Kraftfahrer (Bericht)	Methoden und Werkzeuge zur Messung von dynamischen Sichtzielen
1997	Speyer, Hartmut (TECMATH GmbH)	FAT- Schriftenreihe Nr. 135: Mathematische Nachbildung des Menschen - RAMSIS 3D Softdummy (Bericht)	Messung von Körperpunkten; Menschmodellmodellierung
1998	Manary, Miriam; Flannagan, Carol; Reed, Matthew; Schneider, Lawrence (University of Michigan)	Development of an Improved Driver Eye Position Model (SAE-Paper)	Messung statischer Augpunktlagen (→SAE J941 2002)

Tabelle A-1: Veröffentlichungen zur Sichtdatenerhebung chronologisch aufgelistet (Fortsetzung)

1999	Reed, Matthew; Manary, Miriam; Flannagan, Carol; Schneider, Lawrence (University of Michigan)	Automobile Occupant Posture Prediction for Use with Human Models (SAE-Paper)	Haltungssimulation basierend auf stat. Fahrhaltungen und Augpunktlagen
1999	Seitz, Thomas Bubb, Heiner (TU München)	Measuring of Human Anthropometry, Posture and Motion (SAE-Paper)	Messung statischer und dynamischer Körperhaltungen und Augpunktlagen
2000	Brückmann, Ralph; Chmielarz, Maria; Churan, Jan; Gottlieb, Wolfgang; Hatzius, Jörgen; Hosemann, Arn; et al.	FAT-Schriftenreihe Nr. 151: Blickfixationen und Blickbewegungen des Fahrzeugführers sowie Hauptsichtbereiche an der Windschutzscheibe (Bericht)	Messung und Analyse von dynamischen Sichtzielen
2000	Reed, Matthew; Lehto, Michelle; Flannagan, Michael (University of Michigan)	Field of View in Passenger Car Mirrors (UMTRI-Report)	Messung von Augpunktlagen und Sichtfeld der indirekten Sicht
2000	Reed, Matthew; Manary, Miriam; Flannagan, Carol; Schneider, Lawrence (University of Michigan)	Comparison of Methods for Predicting Automobile Driver Posture (SAE-Paper)	Haltungssimulation basierend auf stat. Fahrhaltungen und Augpunktlagen
2001	Bubb, Heiner Hudelmaier, Jörg (TU München)	1-Liter-Auto und anthropometrische Gestaltung (VDI-Bericht)	Messung und Analyse von dynamischen Sichtzielen
2001	Jahns, Steven (PACCAR); Reed, Matthew (University of Michigan); Hardee, Lenora (International Truck and Engine Corp.)	Methods for In-Vehicle Measurement of Truck Driver Postures (SAE-Paper)	Messung statischer Fahrhaltungen und Augpunktlagen
2002	Flannagan, Michael; Sivak, Michael; Mefford, Mary Lynn (University of Michigan)	Distance Perception in Camera-Based Rear Vision Systems (SAE-Paper)	Messung von Augpunktlagen relative zu Displays von KMS
2002	SAE International	Motor Vehicle Drivers' Eye Locations (SAE Norm J941 2002)	Definition des Augellipsoid Version 2
2002	Hudelmaier, Jörg (TU München)	Sichtanalyse im Pkw unter Berücksichtigung von Bewegung und individuellen Körpercharakteristika (Dissertation)	Messung dyn. Sichtziele; Übertragbarkeit auf Menschmodell
2003	Alliance of Automobile Manufacturers	Statement of Principles, Criteria and Verification Procedures on Driver Interactions with Advanced In-Vehicle Information and Communication Systems (Bericht)	Absicherung von Informations- und Kommunikations- systemen mittels Augpunktlagen

Tabelle A-1: Veröffentlichungen zur Sichtdatenerhebung chronologisch aufgelistet (Fortsetzung)

2003	Lehto, Michelle; Reed, Matthew (University of Michigan)	A Method for Measuring the Field of View in Vehicle Mirrors (SAE-Paper)	Statische Messung von Augpunktlagen und Spiegelkontur; Sichtfeldberechnung
2003	Schweigert, Manfred (TU München)	Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben (Dissertation)	Messung dynamischen Blickverhaltens; Fahraufgabe
2006	Scholly, Uwe (Daimler AG)	Sicht im PKW – Evaluationsmethoden in der Praxis (Beitrag GfA Herbstkonferenz 2006)	Messung und Analyse von dynamischen Augpunktlagen und Blickrichtungen
2006	Shibata, Yuichi (Koito Manufacturing Co., Ltd.); Schmidt-Clausen, H.-J (TU Darmstadt); Diem, Carsten (Koito Europe N.V.)	The Evaluation of AFS Beam Pattern using the Movement of the Driver's Eye Fixation Points (SAE-Paper)	Dynamische Messung von Sichtzielen in Kurven
2007	Duchowski, Andrew (Clemson University)	Eye Tracking Methodology: Theory and Practice (Buch)	Messung und Analyse von dynamischen Augpunktlagen und Blickrichtungen
2008	Link, Daniel; Tietze, Heiko; Schmidt, Ludger et al.	Berührungslose Augen- und Blickbewegungsmessung (Beitrag)	Blickbewegung; Optisches Messsystem
2009	Hristov, Borislav (TU Dresden)	Untersuchung des Blickverhaltens von Kraftfahrern auf Autobahnen (Dissertation)	Sicht; Fixation; Blickbewegung; Fahraufgabe;
2010	Cook, Sharon (Department for Transport UK)	The Development of Improvements to Drivers' Direct and Indirect Vision from Vehicles Phase 1 (Bericht)	Wissenstand zur direkten und indirekten Sicht
2010	Fröhmel, Christin (TU München)	Validierung des Ramsis-Krafthaltungsmodells (Dissertation)	Menschmodell; Validierung der Haltungsermittlung
2010	Müller, Alexander (Universität Stuttgart)	Systematische und nutzerzentrierte Generierung des Pkw-Maßkonzepts als Grundlage des Interior- und Exteriordesign (Dissertation)	Augpunktbasierendes Maßkonzept; Sichtszzenarien;
2010	Woyna, Lars; Gloger, Stefan; Bruder, Ralph (TU Darmstadt)	Methodische Ansätze zur Sichtbeurteilung im Fahrzeug (Beitrag GfA Kongress 2010)	Dynamische Sichtanalyse; direkte Sicht
2010	Yijun, Liu; Shen Yanhua; Xiaxu, Huang; (University of Science and Technology, Beijing)	Design of Eye-cab of dump truck (SAE-Paper)	Augpunkt als Referenzpunkt zur Konzeptauslegung


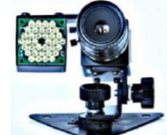







Tabelle A-1: Veröffentlichungen zur Sichtdatenerhebung chronologisch aufgelistet (Fortsetzung)

2011	Bürkle, Kai; Kamusella, Christiane; Hoske, Petra (TU Dresden)	Methode zur prozess- und nutzerabhängigen Sichtanalyse bei mobilen Arbeitsmaschinen (Beitrag GfA Kongress 2011)	Sichtbedingungen; Sichtanalyse
2011	Cook, Sharon (Department for Transport UK)	The Development of Improvements to Drivers' Direct and Indirect Vision from Vehicles Phase 2 (Bericht)	Unfallursachen; Sichtverdeckung, Methoden zur Bestimmung direkter und indirekter Sicht
2011	Woyna, Lars; Gloger, Stefan; Bruder, Ralph et al. (TU Darmstadt)	Der Einfluss der Sichtbeeinträchtigung durch die A-Säule auf die Fahrzeugführung – eine Vergleichsstudie im Fahrsimulator (Beitrag GfA Kongress 2011)	direkte Sicht; Fahrsimulator
2012	Bothe, Alexander (Daimler AG)	Dimensioning of actual fields of indirect vision of commercial vehicles by analyzing dynamic vision situations (Beitrag 21. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik)	Grundlage zur Messung dyn. Augpunktlagen, Sichtzielen & Fahr- zeugparametern;
2012	Bothe, Alexander (Daimler AG)	Analysis of dynamic vision situations as a basic condition for human model based design of commercial vehicles (Beitrag RAMSIS User Conference 2012)	Messung von dyn. Augpunktlagen, Fahrhaltungs- simulation
2013	Bothe, Alexander (Daimler AG)	Selection of relevant test parameters and their influence on first results of the analysis of dynamic vision situations in commercial vehicles (Beitrag 59. GfA-Kongress)	Variablenauswahl zur Erhebung dyn. Sichtdaten, Stichprobe
2013	Bothe, Alexander (Daimler AG)	Method of the analysis of dynamic vision situations as a fundamental component of the vehicle development process and realistic criterion for systematic ergonomic evaluation (Beitrag RAMSIS User Conference 2013)	Methode z. Analyse dyn. Sichtsituationen Entwicklungs- prozess; simula- tionsbasierte Ergo- nomiebewertung
2013	Friedrichsen, Viktor (FH Kaiserslautern)	Erstellung eines neuen RAMSIS LKW-Fahrhaltungsmodells (Masterarbeit)	Statische Augpunkt- lagen als Input zur Fahrhaltungs- simulation
2013	Remlinger, Wolfram (TU München)	Analyse von Sichteinschränkungen im Fahrzeug (Dissertation)	Sichtsimulation mit Menschmodellen; Versuche zu kritischen Sichtszensarien
2013	Woyna, Lars (TU Darmstadt)	Fahrerzentrierter Kriterienkatalog zur Außensichtbeurteilung im PKW (Dissertation)	Beurteilung direkter Sicht mit Daten aus dynamischen Sicht- strahlungsmessungen
2013	Zaindl, Albert (TU München)	Method to analyze the body movement for the mirror view and test method to verify the simulated results (Beitrag 2nd International Digital Human Modeling Symposium)	Beurteilung der indirekter Sicht mit Daten aus dynamischen Sicht- strahlungsmessungen








## A2 Messsysteme zur Sichtdatenerhebung

Tabelle A-2: Verfügbare Messsysteme zur Sichtdatenerhebung (nach Isella 2012)

Messverfahren und -systeme	Hersteller	Messprinzip	Beschreibung	Quelle
<b>Erfassung von dynamischen Augpunktlagen und Sichtstrahlorientierungen</b>				
faceLAB 5	Seeing Machines Inc	optisch mit Kameras, ortsfest	Je System zwei auf den Fahrer gerichtete Kameras, eine Szene-Kamera, zwei Infrarotstrahler und einen Rechner mit Mess- und Auswertesoftware, zusätzliche Systeme können ergänzt werden. Erfasst werden Augen-, Augenbrauen- und Lippenbewegungen, Kopfposition und -rotation, Öffnung der Augenlider und Pupillengröße. Kopfposition und Blickrichtung können dreidimensional dargestellt werden. Ermüdung der Augen kann erfasst werden. Messung bei Tageslicht ohne Infrarotstrahler möglich. 	seeingmachines.com
SmartEye Pro	Smart Eye AB	optisch mit Kameras, ortsfest	Zwei bis acht Kameras können installiert werden. Es ermöglicht eine Sichtfeldaufnahme von 90-360°. Durch Infrarotstrahler bei Tag und bei Nacht Aufnahmen möglich. Sechs Freiheitsgrade der Kopforientierung, Augenpositionen, Blickrichtung, Pupillendurchmesser, Fixationen, Blinzeln und Augenlidöffnung können ausgegeben werden. 	smarteye.se
<b>Erfassung von dynamischen Sichtstrahlorientierungen</b>				
SMI RED	SensoMotoric Instruments GmbH (SMI)	optisch mit Kameras, ortsfest	Berührungsloses geschlossenes System mit ferngesteuerten Infrarotkameras und binokulare Aufnahme. Als Ausgangsgrößen erhält man Pupillendurchmesser und Blickorientierung auf einer Fläche. Es wurde für die Blickerfassung auf Bildschirmen und Leinwänden entwickelt und ist nicht erweiterbar. 	smivision.com
Tobii T/X Series Eye Tracking	Tobii Technology AB	optisch, ortsfest	Über Bildsensoren werden Informationen des Probanden gemessen und die Reflektion der Infrarotstrahlen am menschlichen Auge von Infrarotsensoren registriert. Eine Software berechnet die dreidimensionale Position des Augpunktes und die Blickrichtung auf eine Fläche. 	tobii.com
Dikablis und D-Lab	Ergoneers GmbH	optisch mit Kameras, kopffest	Die größenverstellbare Head-Unit besteht aus EyeCam mit Infrarotbeleuchtung und FieldCam für die Aufzeichnung der Umgebung. Die Verbindung zum Rechner ist über Kabel oder Funk möglich. Die Experimentalssoftware D-Lab unterstützt die Projektplanung, Versuchsdurchführung und Datenanalyse. 	ergoneers.com
VIEW X HED	SensoMotoric Instruments GmbH (SMI)	optisch mit Kameras, kopffest	Head-Unit mit Augen- und Szene-Kamera, Verwendung von Infrarotbeleuchtung und halbdurchlässigem Spiegel. Sowohl Video- als auch Tonaufnahmen möglich. Datenübertragung über Kabel zu einem Notebook. Ausgangsgrößen sind Pupillendurchmesser und Blickrichtung. 	smivision.com
Janus	Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie	optisch mit Kameras, kopffest	System besteht aus Helm mit Augen- und Szenekamera und Signalverarbeitungseinheit. Erfassung der Pupille wird durch Infrarotlicht unterstützt. Das Endprodukt ist ein Blickfilm, in welchem die Sichtfeldaufnahmen und die Fixierungspunkte übereinander gelegt wurden. 	Dissertation Hudelmaier 2003

Messverfahren und -systeme	Hersteller	Messprinzip	Beschreibung	Quelle
EyeLink II	SR Research Ltd.	optisch mit Kameras, kopffest	Head-Unit mit zwei Augen-Kameras mit Infrarotbeleuchtung für binokulare Aufnahmen und eine Kamera für die Sichtzielorientierung. Keine Spiegel notwendig, damit für robustere Anwendungen geeignet.	sr-research.com
SMI Eye Tracking Glasses	SensoMotoric Instruments GmbH (SMI)	optisch, kopffest	Funktionsprinzip ist nicht veröffentlicht. Hochauflösende Szene-Kamera, keine aktiven Marker notwendig. Binokulare Aufnahmen von Pupillendurchmesser und Sichtstrahlorientierung. Keine manuelle Kalibrierung notwendig.	eyetracking-glasses.com
Tobii Glasses Eye Tracker	Tobii Technology AB	optisch mit Kameras, kopffest	Das System besteht aus Brille, Aufnahmegerät und Infrarotmarkern. An der Brille sind Infrarotleuchten, eine Szene-Kamera, ein Mikrofon, ein Sensor für die Detektion der Augen und ein Sensor für die Kommunikation mit den Infrarotmarkern installiert. Es ermöglicht monokulare Aufnahme von Sichtzielorientierung auf der mit Infrarotmarkern versehenen Fläche.	tobii.com
Mobile Eye-XG	Applied Science Laboratories (ASL)	optisch mit Kameras, kopffest	Video- und Tonaufnahmen der Augen und einer Szenekamera können über Funk in Echtzeit auf einem Laptop untersucht werden. Als Enddaten erhält man die Fixationspunkte. EYE-TRAC 6 ist die Bedieneinheit für das Messsystem. Das System basiert auf dem alten System ETS (Eye Tracking System) der Firma Dornier.	asleyetracking.com
Chronos Eye Tracking Device (C-ETD)	CHRONOS VISION GmbH	magnetisch, elektrisch, kopffest	Bei der Scleral Search Coil Technik wird eine in einem Silikonring eingebettete Spule auf die Sklera des Auges angebracht. Die Testperson ist in einem homogenen Magnetfeld positioniert. Durch Veränderung des Winkels der Spule bzw. des Auges, wird eine Spannung generiert. Präziseste Messung der drei Freiheitsgrade der Augbewegung und optional der sechs Freiheitsgrade der Kopfbewegung. Einsatz in der Forschung und für klinische Labore, zur Untersuchung des Gleichgewichtssinns und der Augenbewegung. Die Silikonringe müssen an den Probanden angepasst werden und sind unangenehm zu tragen.	chronos-vision.de
Electro-OculoGraphy (EOG)		elektrisch, kopffest	Um die Augen des Probanden werden mehrere Elektroden platziert und die Änderung des elektrischen Potenzials der Haut gemessen. Die Messwerte liegen zwischen 15-200 $\mu V$ . Mit dieser Technik wird die Augbewegung relativ zur Kopfbewegung gemessen, d.h. für die Messung der Kopfposition wird ein weiteres Messsystem benötigt.	Duchowski 2007 metrovision.fr
Erfassung von statischen Körperpunkten und Augpunktlagen				
FARO Messarm	FARO Europe GmbH & Co. KG	Messsonde	Der FARO Arm ist mit sechs Freiheitsgraden sehr agil. Er ist in verschiedenen Größen erhältlich. An der Spitze des Arms befindet sich eine Messsonde. Sobald sie mit einem Gegenstand in Berührung kommt, berechnet er mit Hilfe von bekannten Koordinaten die Koordinaten des Berührungspunkts. Eine weitere Möglichkeit ist die manuelle Auslösung zur Aufnahme der Daten. Er kann für die statische Messung von Körperpunkten verwendet werden.	faro.com



Messverfahren und -systeme	Hersteller	Messprinzip	Beschreibung	Quelle
PCMAN	Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie	Stereophotogrammetrie, optisch mit Kameras, ortsfest	Das Modell passt die individuelle Anthropometrie und Bewegung einer Versuchsperson an das Menschmodell RAMSIS an. Probanden werden aus unterschiedlichen Perspektiven von mehreren Kameras aufgenommen, woraus ein Kalibrieralgorithmus die Kamerastandorte berechnet. RAMSIS wird der aufgenommenen Person überlagert. Damit sind alle wichtigen Körpermaße bekannt und es können weitere Haltungen, z.B. Sitzen im Fahrzeug, vermessen werden. Eine berührungslose Datenerfassung von statischen Haltungen, oder auch ganzer Filme ist so möglich. 	Ergonomie aktuell, Seitz 2002
ARTTRACK System, TRACKPACK System, SMARTTRACK	Advanced Realtime Tracking GmbH	optisch mit Kameras und Marker, ortsfest und körperfest	Die verschiedenen Systeme unterscheiden sich in der Anzahl der Infrarotkameras (2-16) und der Reichweite (bis zu 6 Meter). Für die Ortung der Person oder des Objektes, müssen an ihnen sogenannte aktive oder passive Marker befestigt werden. Die Marker können sich an sogenannten Flysticks oder Fingertracking Systemen befinden, mit denen die Personen die virtuelle Sicht verändern kann. Die DTrack2 Software berechnet und kontrolliert die Simulation. 	ar-tracking.com
IS-900 Systems	InterSense Incorporated	inertial-ultraschall	Orientierungs- und Positionsänderungen werden durch Beschleunigungssensoren gemessen. Der Gierwinkel wird mit Hilfe eines Ultraschall-Messsystems erfasst. 	InterSense.com
MotionStar	Ascension Technology Corporation	elektromagnetisch, körperfest	Das System wird häufig für die Herstellung von Animationsfilmen verwendet. Die Person wird an Armen, Beinen, Oberkörper und Kopf mit Gleichstrom Magnetsensoren versehen, wodurch jede Bewegung mit sechs Freiheitsgraden aufgenommen werden kann. Es ist aber darauf zu achten, dass sich nicht zu viele Ferrometalle in der Nähe befinden, da es sonst zu Störungen kommen kann. 	ascension-tech.com
Simi Motion	Simi Reality Motion Systems GmbH	optisch mit Kameras, ortsfest	Das System kann mit vier Kameras mit 500 Hz installiert werden. Es ist erweiterbar auf bis zu 18 Kameras mit 100 Hz. Die Erfassung ist mit und ohne Marker möglich. Es stehen Erweiterungsmodule wie Kraftmessung, Druckverteilungsmessung oder Berechnung des Körperschwerpunkts zur Verfügung. 	simi.de
T-Series, Bonita	Vicon Motion Systems and Peak Performance Inc.	optisch mit Kameras, ortsfest	Über Marker, die an Personen befestigt sind, nehmen Infrarotkameras die Bewegung auf. 	vicon.com
3D-Scanner		optisch mit Laser und Kamera, ortsfest	Beim 3D Scannen wird mit einer Laserlinie über das Objekt oder den menschlichen Körper gefahren. Eine CCD-Kamera nimmt die Kontur der Laserlinie auf. Zu jedem aufgenommenen Pixel werden die Koordinaten berechnet, so dass Aussagen zu der räumlichen Ausdehnung gemacht werden können. 	ag-vp- www.informatik.uni-kl.de



### A3 Übersicht der Faktorstufen

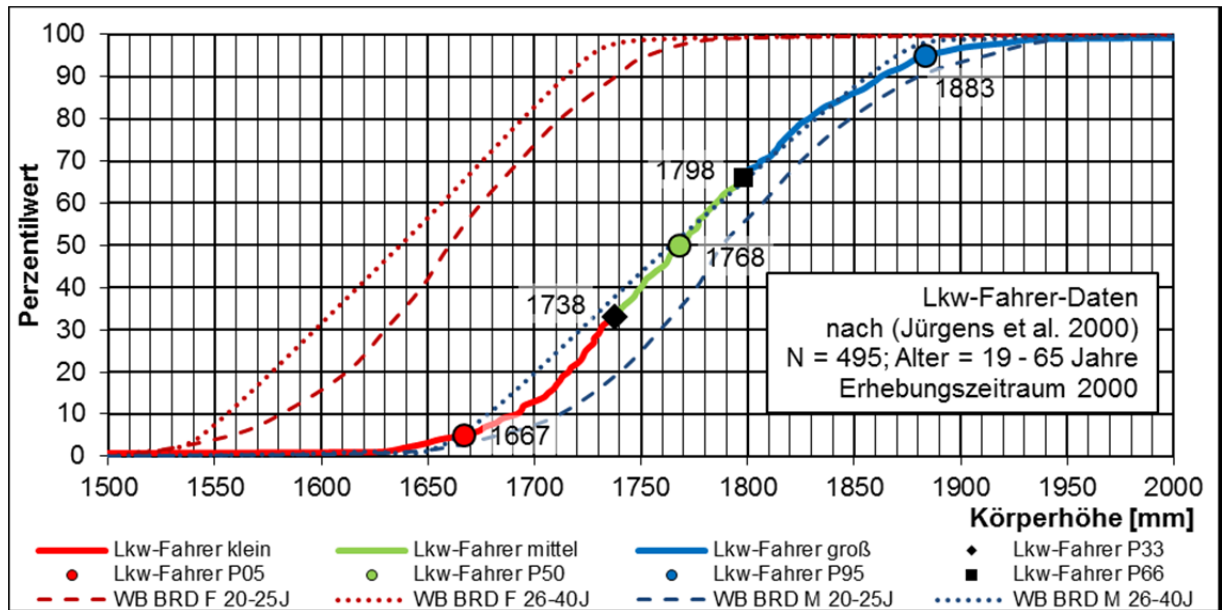


Abbildung A-1: Faktorstufen der Körperhöhe (Faktor A) (e. D. n. Jürgens 1999 B-1.2; Jürgens et al. 2000 S. 30)

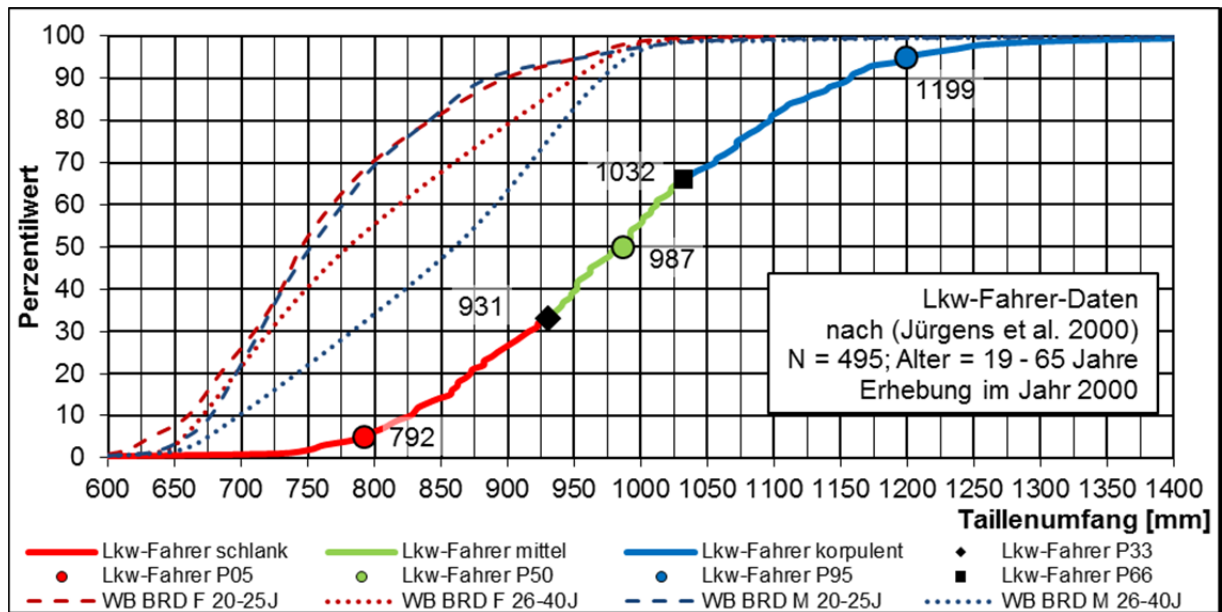


Abbildung A-2: Faktorstufen des Taillenumfangs (Faktor B) (e. D. n. Jürgens 1999 B-1.2; Jürgens et al. 2000 S. 31)

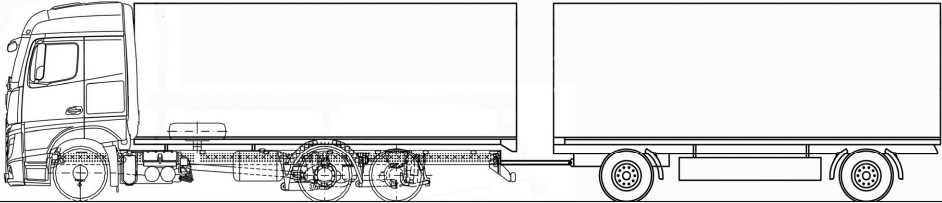
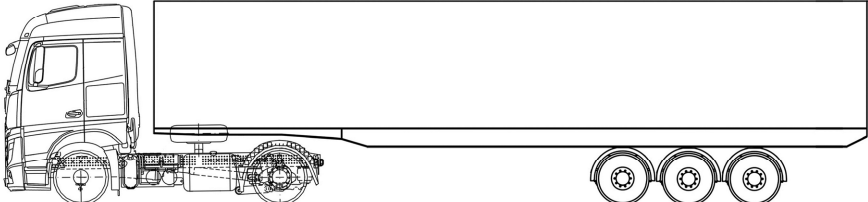
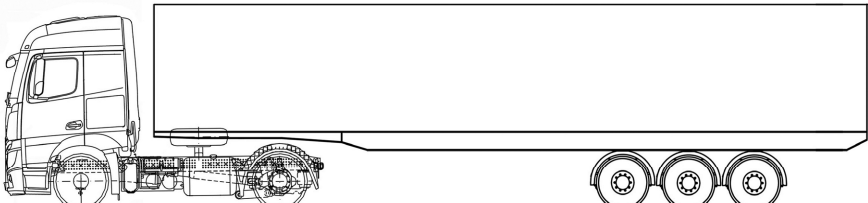
<b>Fahrzeug V1:</b> <b>Gliederzug</b> mit breitem und hoch aufgesetztem Fahrerhaus	
<b>Fahrzeug V2:</b> <b>Sattelzug</b> mit breitem und hoch aufgesetztem Fahrerhaus	
<b>Fahrzeug V3:</b> <b>Sattelzug</b> mit schmalem und niedrig aufgesetztem Fahrerhaus	

Abbildung A-3: Faktorstufen der Fahrzeugvarianten (Faktor C) (e. D. nach Daimler 2011a S. 56 f.; Isella 2012 S. 50 f.)

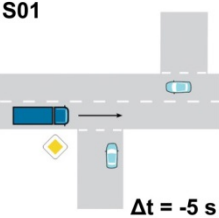
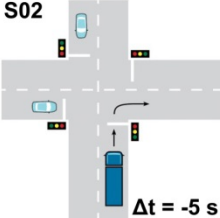
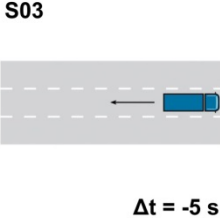
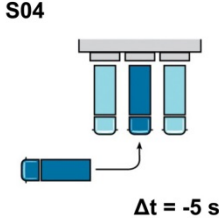
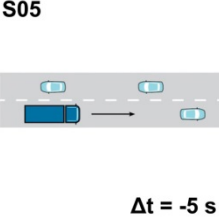
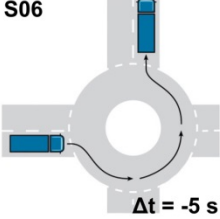
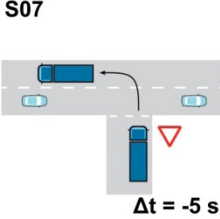
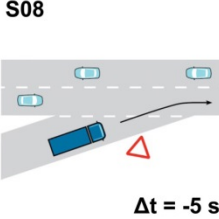
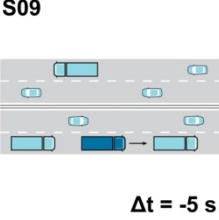
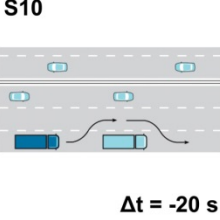
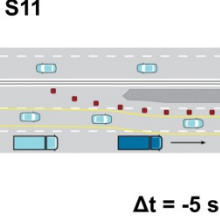
<b>Stadt- &amp; Rangier- Sichtsituationen</b>	<b>S01</b>  $\Delta t = -5 \text{ s}$	<b>S02</b>  $\Delta t = -5 \text{ s}$	<b>S03</b>  $\Delta t = -5 \text{ s}$	<b>S04</b>  $\Delta t = -5 \text{ s}$
<b>Landstraßen- Sichtsituationen</b>	<b>S05</b>  $\Delta t = -5 \text{ s}$	<b>S06</b>  $\Delta t = -5 \text{ s}$	<b>S07</b>  $\Delta t = -5 \text{ s}$	<b>S08</b>  $\Delta t = -5 \text{ s}$
<b>Autobahn- Sichtsituationen</b>	<b>S09</b>  $\Delta t = -5 \text{ s}$	<b>S10</b>  $\Delta t = -20 \text{ s}$	<b>S11</b>  $\Delta t = -5 \text{ s}$	

Abbildung A-4: Faktorstufen der Sichtsituationen (Faktor D) (e. D. n. Isella 2012 S. 65)

## A4 Ablaufplan und Versuchsstrecke

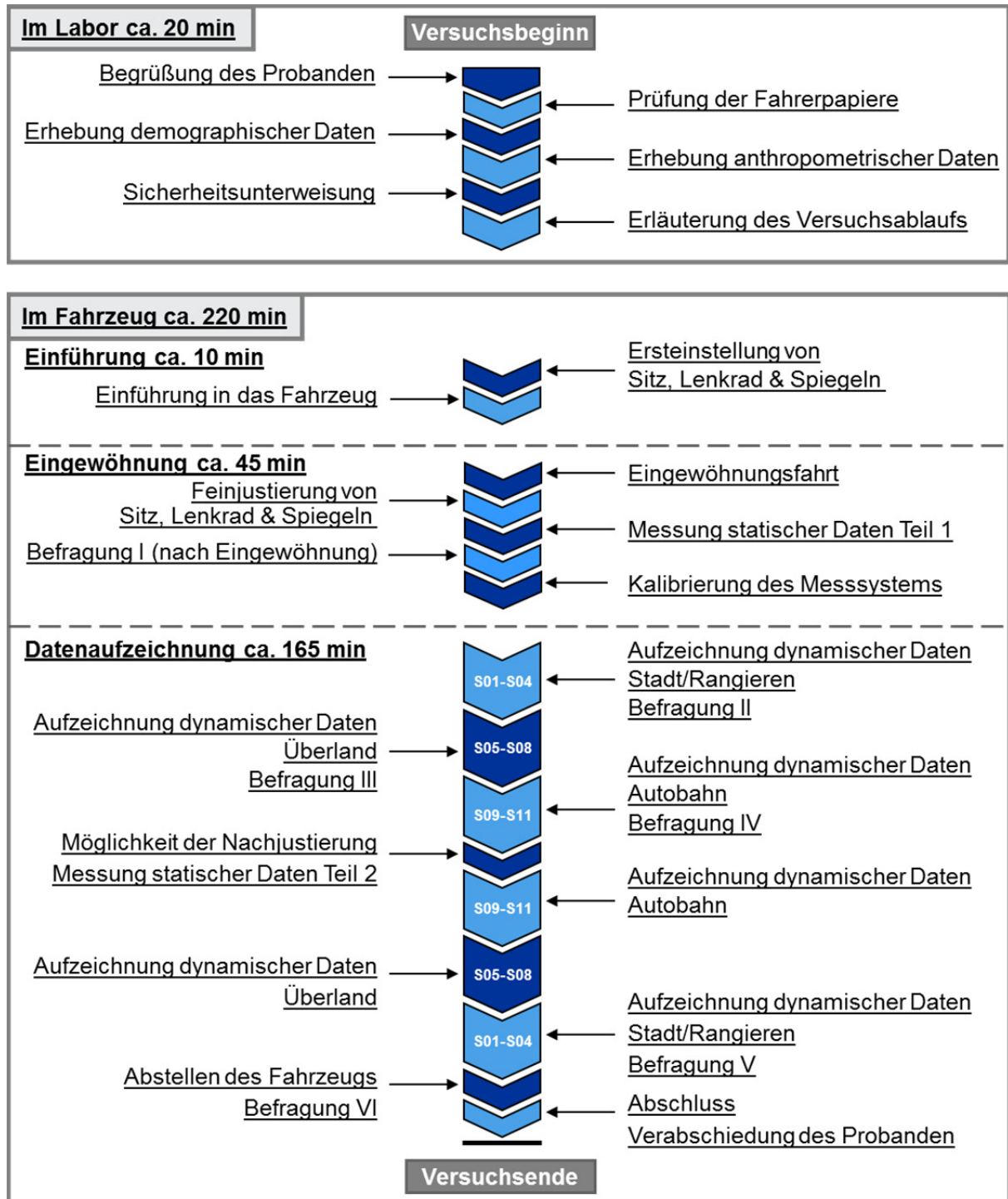


Abbildung A-5: Ablaufplan Probandenversuch



Abbildung A-6: Versuchsstrecke Teil 1 mit Rangier-, Stadt- und Landstraßenanteilen (e. D. aus Google Maps 2014)



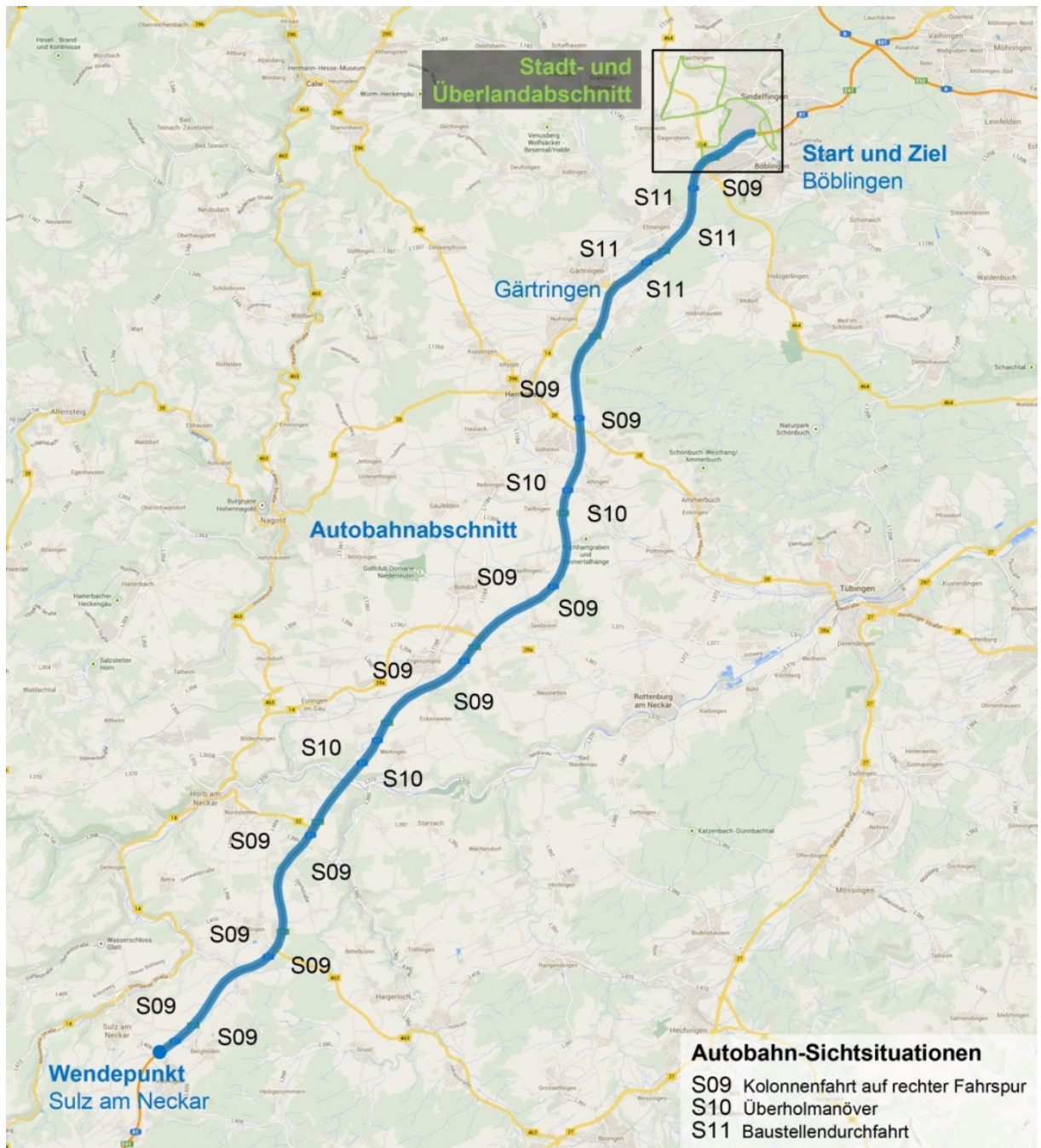


Abbildung A-7: Versuchsstrecke Teil 2 Autobahnabschnitt (e. D. aus Google Maps 2014)

## A5 Stichprobenbeschreibung

Tabelle A-3: Anthropometrische und demographische Daten der Stichprobe V1 n = 48

VP	KH [mm]	SL [mm]	TU [mm]	KM [kg]	NAT	G [M/F]	BJ [Jahr]	PO	A [Jahre]	SH [ja/nein]	ST [%]	LA [%]	AB [%]	FE [Jahre]	FL [km/Jahr]
01	1865	976	1010	106,5	GER	M	2012	Truck	39	j	10,0	50,0	40,0	15	10.000
03	1845	942	1050	102,5	GER	M	2012	Truck	49	n	50,0	25,0	25,0	30	50.000
04	1715	920	950	84,0	GER	M	2012	Truck	51	n	60,0	30,0	10,0	30	60.000
05	1810	920	950	87,0	GER	M	2012	Truck	36	n	20,0	20,0	60,0	15	120.000
06	1770	930	1050	96,4	GER	M	2012	Truck	42	n	100,0	0,0	0,0	8	10.000
08	1890	988	1385	145,0	GER	M	2012	Truck	34	n	40,0	25,00	35,0	11	2.500
10	1880	966	1250	128,0	GER	M	2012	Truck	38	n	40,0	40,0	20,0	20	110.000
12	1725	895	1070	86,0	GER	M	2012	Truck	38	n	50,0	20,0	30,0	13	60.000
14	1842	933	920	89,4	GER	M	2012	Truck	35	n	30,0	40,0	30,0	14	30.000
15	1791	935	860	75,8	GER	M	2012	Truck	37	n	10,0	20,0	70,0	18	100.000
16	1785	932	1120	94,4	GER	M	2012	Truck	43	n	20,0	10,0	70,0	18	200.000
17	1736	902	1160	103,1	GER	M	2012	Truck	60	j	0,0	40,0	60,0	40	80.000
18	1717	868	1020	87,3	GER	M	2012	Truck	45	n	33,0	33,0	33,0	8	30.000
19	1779	956	990	85,2	GER	M	2012	Truck	46	n	100,0	0,0	0,0	26	5.000
20	1664	913	940	80,7	GER	M	2012	Truck	30	n	0,0	70,0	30,0	8	30.000
21	2052	1032	1220	146,0	GER	M	2012	Truck	28	n	20,0	20,0	60,0	8	40.000
22	1715	906	1065	96,0	GER	M	2012	Truck	38	n	60,0	20,0	20,0	20	120.000
23	1815	934	1345	138,0	GER	M	2012	Truck	54	j	40,0	30,0	30,0	26	100.000
24	1712	908	960	76,4	GER	M	2012	Truck	44	n	85,0	7,5	7,5	21	15.000
25	1828	924	1050	91,8	GER	M	2012	Truck	53	n	40,0	50,0	10,0	25	5.000
26	1681	894	1050	87,5	GER	M	2012	Truck	51	n	30,0	20,0	50,0	30	50.000
27	1680	906	890	76,0	GER	M	2012	Truck	48	n	40,0	40,0	20,0	19	70.000
28	1844	934	1085	101,0	GER	M	2012	Truck	37	n	10,0	30,0	60,0	16	2.500
29	1750	900	1100	92,9	GER	M	2012	Truck	51	n	70,0	30,0	0,0	33	3.000
31	1715	926	1160	111,0	GER	M	2012	Truck	56	n	20,0	70,0	10,0	8	5.000
33	1960	985	1250	122,8	GER	M	2012	Truck	56	j	30,0	30,0	40,0	18	3.000
34	1969	1045	600	87,5	GER	M	2012	Truck	41	n	20,0	30,0	50,0	19	7.000
36	1720	920	910	78,0	GER	M	2012	Truck	38	j	30,0	70,0	0,0	3	12.000
37	1833	950	1290	121,8	GER	M	2012	Truck	62	n	0,0	20,0	80,0	25	15.000
39	1765	900	1030	86,0	GER	M	2012	Truck	45	n	45,0	45,0	10,0	23	20.000
41	1672	872	970	77,7	GER	M	2012	Truck	35	n	15,0	15,0	70,0	11	50.000
43	1817	908	1010	88,9	GER	M	2012	Truck	56	n	5,0	15,0	80,0	32	150.000
44	1766	892	1060	91,4	GER	M	2012	Truck	47	j	20,0	60,0	20,0	26	35.000
45	1732	921	1090	97,8	GER	M	2012	Truck	35	j	10,0	30,0	60,0	18	40.000
46	1837	957	1070	98,6	GER	M	2012	Truck	42	n	80,0	10,0	10,0	16	30.000
48	1840	985	1140	114,9	GER	M	2012	Truck	21	j	30,0	50,0	20,0	3	15.000
49	1870	939	1060	101,2	GER	M	2012	Truck	32	j	20,0	40,0	40,0	9	50.000
50	1808	923	960	79,7	GER	M	2012	Truck	45	j	10,0	20,0	70,0	24	20.000
51	1820	910	1150	104,0	GER	M	2012	Truck	42	j	5,0	5,0	90,0	20	4.000
52	1741	891	960	86,6	GER	M	2012	Truck	36	n	15,0	15,0	70,0	4	100.000
53	1746	923	1150	95,8	GER	M	2012	Truck	62	n	10,0	70,0	20,0	44	10.000
57	1830	950	1260	133,0	GER	M	2012	Truck	43	j	20,0	20,0	60,0	5	6.000
60	1850	920	990	92,2	GER	M	2012	Truck	41	n	35,0	35,0	30,0	21	60.000
62	1786	953	1030	90,5	GER	M	2012	Truck	34	n	40,0	30,0	30,0	16	70.000
66	1745	890	1020	84,9	GER	M	2012	Truck	47	j	25,0	25,0	50,0	28	40.000
72	1710	885	1060	95,1	GER	M	2012	Truck	37	n	70,0	20,0	10,0	14	15.000
77	1811	942	1120	101,6	GER	M	2012	Truck	60	j	20,0	80,0	0,0	40	80.000
79	1770	915	900	79,1	GER	M	2012	Truck	45	j	10,0	30,0	60,0	27	120.000
MIN	1664	868	600	76,4					21		0,00	0,00	0,0	3	2.500
MAX	2052	1045	1385	146,0					62		100,00	80,00	90,0	44	200.000
MW	1792	929	1057	97,4	GER	M	2012	Truck	42,0	15/33	32,1	31,4	36,5	19,3	47.083

Tabelle A-4: Anthropometrische und demographische Daten der Stichprobe V2 n = 49

VP	KH [mm]	SL [mm]	TU [mm]	KM [kg]	NAT	G [M/F]	BJ [Jahr]	PO	A [Jahre]	SH [ja/nein]	ST [%]	LA [%]	AB [%]	FE [Jahre]	FL [km/Jahr]
02	1884	977	1300	144,8	GER	M	2012	Truck	35	n	50,0	30,0	20,0	12	2.500
03	1760	920	1000	85,0	GER	M	2012	Truck	49	n	10,0	20,0	70,0	20	10.000
04	1970	1050	860	85,0	GER	M	2012	Truck	41	n	20,0	40,0	40,0	19	7.000
05	1700	895	1100	101,0	GER	M	2012	Truck	64	j	20,0	30,0	50,0	45	20.000
07	1813	929	1040	90,7	GER	M	2012	Truck	53	j	50,0	40,0	10,0	20	1.500
10	1745	895	1080	90,0	GER	M	2012	Truck	56	n	5,0	5,0	90,0	15	180.000
18	1710	890	950	77,0	GER	M	2012	Truck	44	n	33,0	33,0	33,0	21	30.000
19	1740	933	1010	86,1	GER	M	2012	Truck	38	n	5,0	5,0	90,0	5	100.000
20	1832	965	1020	92,5	GER	M	2012	Truck	47	j	10,0	30,0	60,0	21	22.500
21	1980	960	1230	122,0	GER	M	2012	Truck	56	j	25,0	25,0	50,0	20	4.000
27	1700	890	1090	95,0	GER	M	2012	Truck	37	n	60,0	30,0	10,0	14	50.000
28	1800	920	1100	100,0	GER	M	2012	Truck	59	j	30,0	50,0	20,0	40	80.000
30	1645	886	990	80,1	GER	M	2012	Truck	30	n	30,0	30,0	40,0	8	100.000
31	1710	900	940	81,5	GER	M	2012	Truck	31	j	70,0	10,0	20,0	3	12.000
32	1750	895	850	65,0	GER	M	2012	Truck	53	j	40,0	20,0	40,0	30	10.000
33	1789	925	850	76,4	GER	M	2012	Truck	37	n	40,0	30,0	30,0	16	22.000
34	1693	911	1190	112,2	GER	M	2012	Truck	57	j	10,0	40,0	50,0	8	5.000
35	1845	969	990	89,7	GER	M	2012	Truck	52	j	30,0	60,0	10,0	18	4.000
36	1710	880	1060	85,0	GER	M	2012	Truck	38	n	40,0	20,0	40,0	13	60.000
37	1740	870	1210	107,0	GER	M	2012	Truck	59	n	60,0	10,0	30,0	40	35.000
38	1730	880	1040	81,0	GER	M	2012	Truck	44	n	10,0	30,0	60,0	21	1.000
43	1645	810	1030	80,0	GER	M	2012	Truck	44	j	20,0	70,0	10,0	23	100.000
44	1705	853	920	77,2	GER	M	2012	Truck	32	n	10,0	20,0	70,0	8	40.000
45	1786	867	980	87,8	GER	M	2012	Truck	50	j	20,0	10,0	70,0	29	6.000
47	1832	981	1140	116,2	GER	M	2012	Truck	21	j	20,0	60,0	20,0	3	10.000
48	1759	885	960	83,4	GER	M	2012	Truck	46	n	60,0	20,0	20,0	26	20.000
49	1850	940	1030	108,0	GER	M	2012	Truck	39	j	20,0	20,0	60,0	18	10.000
50	1925	960	910	85,0	GER	M	2012	Truck	40	n	20,0	20,0	60,0	20	10.000
51	1724	914	920	76,6	GER	M	2012	Truck	52	n	30,0	40,0	30,0	30	40.000
53	1829	903	1000	91,7	GER	M	2012	Truck	26	n	20,0	40,0	40,0	7	15.000
54	1722	904	1190	106,6	GER	M	2012	Truck	39	n	40,0	30,0	30,0	20	200.000
56	1925	990	1000	105,0	GER	M	2012	Truck	47	n	80,0	10,0	10,0	20	2.000
57	1690	870	1060	96,0	GER	M	2012	Truck	38	n	30,0	30,0	40,0	20	100.000
58	1795	920	970	81,0	GER	M	2012	Truck	45	j	10,0	30,0	60,0	22	25.000
60	1716	897	1010	92,5	GER	M	2012	Truck	46	n	20,0	40,0	40,0	3	80.000
61	1771	902	960	75,5	GER	M	2012	Truck	45	n	0,0	50,0	50,0	8	20.000
62	1810	920	1120	103,9	GER	M	2012	Truck	42	j	50,0	30,0	20,0	20	4.000
63	1730	905	1070	98,0	GER	M	2012	Truck	35	j	30,0	40,0	30,0	17	70.000
64	1750	880	990	82,0	GER	M	2012	Truck	48	j	40,0	20,0	40,0	20	55.000
66	1831	895	900	90,9	GER	M	2012	Truck	36	n	35,0	35,0	30,0	18	20.000
67	1761	915	1070	91,7	GER	M	2012	Truck	47	j	35,0	15,0	50,0	26	30.000
68	1655	886	1000	85,4	GER	M	2012	Truck	51	n	20,0	30,0	50,0	31	70.000
69	1660	825	890	69,0	GER	M	2012	Truck	56	j	10,0	10,0	80,0	25	12.500
75	1851	948	1250	123,8	GER	M	2012	Truck	38	n	20,0	40,0	40,0	17	50.000
76	1734	905	1000	86,1	GER	M	2012	Truck	39	n	10,0	20,0	70,0	12	120.000
78	1788	866	1210	117,4	GER	M	2012	Truck	39	j	50,0	30,0	20,0	17	20.000
79	1816	932	1040	100,4	GER	M	2012	Truck	37	n	5,0	25,0	70,0	18	40.000
81	1834	956	970	99,8	GER	M	2012	Truck	37	n	40,0	50,0	10,0	16	3.000
84	1747	898	1040	85,5	GER	M	2012	Truck	45	n	20,0	40,0	40,0	24	20.000
MIN	1645	810	850	65,0					21		0,0	5,0	10,0	3	1.000
MAX	1980	1050	1300	144,8					64		80,0	70,0	90,0	45	200.000
MW	1773	912	1031	92,7	GER	M	2012	Truck	43,7	20/29	28,8	29,9	41,3	18,9	39.776

Tabelle A-5: Anthropometrische und demographische Daten der Stichprobe V3 n = 55

VP	KH [mm]	SL [mm]	TU [mm]	KM [kg]	NAT	G [M/F]	BJ [Jahr]	PO	A [Jahre]	SH [ja/nein]	ST [%]	LA [%]	AB [%]	FE [Jahre]	FL [km/Jahr]
02	1800	940	1010	87,0	GER	M	2012	Truck	36	n	15,0	35,0	50,0	15	100.000
03	1848	935	1050	102,4	GER	M	2012	Truck	50	n	33,0	33,0	34,0	30	50.000
04	1810	920	1000	91,3	GER	M	2012	Truck	54	j	30,0	50,0	20,0	30	2.000
05	1890	941	830	76,1	GER	M	2012	Truck	28	n	10,0	40,0	50,0	4	9.000
06	1836	910	930	81,0	GER	M	2012	Truck	29	n	20,0	40,0	40,0	4	5.500
07	1710	870	980	76,0	GER	M	2012	Truck	40	n	30,0	30,0	40,0	22	100.000
08	1850	960	1000	90,0	GER	M	2012	Truck	52	j	20,0	30,0	50,0	18	5.000
09	1725	878	990	74,4	GER	M	2012	Truck	56	n	10,0	20,0	70,0	33	120.000
10	1748	918	1000	86,0	GER	M	2012	Truck	39	n	10,0	20,0	70,0	12	120.000
11	1756	950	1190	103,0	GER	M	2012	Truck	62	n	10,0	10,0	80,0	42	100.000
13	1810	910	1260	121,0	GER	M	2012	Truck	63	n	10,0	10,0	80,0	25	80.000
14	1730	900	930	78,0	GER	M	2012	Truck	51	n	60,0	30,0	10,0	31	100.000
15	1724	899	1130	93,6	GER	M	2012	Truck	51	n	40,0	40,0	20,0	30	8.000
16	1694	912	1290	129,8	GER	M	2012	Truck	57	n	50,0	50,0	0,0	8	7.000
19	1980	1040	900	88,0	GER	M	2012	Truck	41	n	20,0	40,0	40,0	19	7.000
20	1700	860	1150	99,0	GER	M	2012	Truck	64	j	20,0	40,0	40,0	45	40.000
21	1752	895	1000	83,6	GER	M	2012	Truck	46	n	60,0	20,0	20,0	26	30.000
22	1747	904	950	84,9	GER	M	2012	Truck	64	j	33,0	33,0	34,0	40	3.000
23	1873	981	1360	143,7	GER	M	2012	Truck	34	n	40,0	30,0	30,0	12	2.500
24	1900	930	940	83,0	GER	M	2012	Truck	27	n	40,0	30,0	30,0	2	2.000
25	1760	910	930	82,0	GER	M	2012	Truck	45	j	25,0	25,0	50,0	15	100.000
26	1936	990	930	105,0	GER	M	2012	Truck	47	n	60,0	30,0	10,0	26	2.000
27	1698	878	1070	95,8	GER	M	2012	Truck	38	n	30,0	30,0	40,0	20	100.000
28	1760	950	970	88,0	GER	M	2012	Truck	57	j	30,0	40,0	30,0	34	8.000
29	1697	879	1220	110,9	GER	M	2012	Truck	36	j	30,0	40,0	30,0	15	5.000
30	1721	871	990	82,3	GER	M	2012	Truck	48	j	40,0	20,0	40,0	28	70.000
32	1701	900	1110	96,6	GER	M	2012	Truck	54	j	30,0	20,0	50,0	29	70.000
35	1770	915	830	68,0	GER	M	2012	Truck	41	n	30,0	40,0	30,0	20	30.000
36	1772	918	950	76,9	GER	M	2012	Truck	52	n	30,0	30,0	40,0	30	150.000
37	1703	907	980	81,8	GER	M	2012	Truck	38	j	20,0	70,0	10,0	3	120.000
38	1669	878	102	84,3	GER	M	2012	Truck	52	n	30,0	20,0	50,0	30	90.000
39	1700	860	1040	84,0	GER	M	2012	Truck	45	n	30,0	30,0	40,0	8	25.000
44	1778	943	840	75,1	GER	M	2012	Truck	37	n	30,0	30,0	40,0	16	1.000
45	1800	900	1190	103,0	GER	M	2012	Truck	42	j	50,0	20,0	30,0	20	4.000
46	1850	970	990	110,0	GER	M	2012	Truck	39	j	15,0	15,0	70,0	16	10.000
47	1760	930	960	99,0	GER	M	2012	Truck	25	n	60,0	20,0	20,0	1	1.000
48	1823	952	1060	107,7	GER	M	2012	Truck	31	j	60,0	10,0	30,0	4	40.000
50	1755	920	1090	93,6	GER	M	2012	Truck	48	j	40,0	35,0	25,0	27	10.000
51	1850	950	1020	98,0	GER	M	2012	Truck	37	n	40,0	40,0	20,0	16	3.000
52	1670	860	1000	81,0	GER	M	2012	Truck	35	n	40,0	20,0	40,0	12	60.000
53	1730	890	1210	106,0	GER	M	2012	Truck	61	j	5,0	95,0	0,0	40	12.000
57	1760	910	920	85,0	GER	M	2012	Truck	49	n	10,0	10,0	80,0	30	5.000
58	1750	915	1220	104,0	GER	M	2012	Truck	53	j	35,0	35,0	30,0	34	5.000
59	1810	910	810	72,0	GER	M	2012	Truck	25	n	15,0	15,0	70,0	7	90.000
60	1854	951	1280	116,1	GER	M	2012	Truck	46	n	33,0	33,0	34,0	18	70.000
61	1710	912	1130	95,5	GER	M	2012	Truck	47	j	10,0	20,0	70,0	25	120.000
62	1740	895	1180	107,0	GER	M	2012	Truck	60	n	60,0	10,0	30,0	40	25.000
63	1700	890	1000	78,0	GER	M	2012	Truck	45	n	60,0	20,0	20,0	20	20.000
65	1740	885	1160	104,0	GER	M	2012	Truck	55	j	10,0	80,0	10,0	34	1.000
66	1750	890	900	84,0	GER	M	2012	Truck	38	n	20,0	40,0	40,0	13	60.000
70	1856	952	1180	117,7	GER	M	2012	Truck	54	j	33,0	33,0	34,0	30	60.000
71	1880	930	1070	100,0	GER	M	2012	Truck	37	n	40,0	30,0	30,0	10	10.000
72	1710	890	1070	96,0	GER	M	2012	Truck	37	n	30,0	10,0	60,0	14	50.000
74	1760	910	960	87,0	GER	M	2012	Truck	51	j	15,0	25,0	60,0	34	120.000
75	1810	865	1040	89,0	GER	M	2012	Truck	50	j	15,0	25,0	60,0	30	6.000
MIN	1669	860	102	68,0					25		5,0	10,0	0,0	1	1.000
MAX	1980	1040	1360	143,7					64		60,0	95,0	80,0	45	200.000
MW	1778	917	1030	94,4	GER	M	2012	Truck	45,4	21/35	30,8	31,2	38,0	21,6	46.561



## A6 Elemente der ergonomischen Sichtdatenbank

Tabelle A-6: Elemente eines Datensatzes der ergonomischen Sichtdatenbank

Kurzzeichen	Bezeichnung	Einheit	Kurzzeichen	Bezeichnung	Einheit
<b>NAT</b>	Nationalität	-	<b>V</b>	Versuchsfahrzeug	-
<b>G</b>	Geschlecht	[M/W]	<b>VP</b>	Versuchsperson	-
<b>BJ</b>	Bezugsjahr	[Jahr]	<b>S</b>	Sichtsituation	-
<b>PO</b>	Population	-	<b>TimeSlot</b>	Messzeitpunkt im Versuch	[10 ms]
<b>A</b>	Lebensalter	[Jahre]	<b>GAUL</b>	Augpunktlage links 3D	3°[mm]
<b>SH</b>	Nutzung Sehhilfe	[ja/nein]	<b>GAUR</b>	Augpunktlage rechts 3D	3°[mm]
<b>FL</b>	Lkw-Fahrleistung	[km/Jahr]	<b>GAUM</b>	Mittelaugpunktlage 3D	3°[mm]
<b>ST</b>	Stadtanteil der FL	[%]	<b>SOL</b>	Sichtstrahlorientierung GAUL	3°[°]
<b>LA</b>	Landstraßenanteil der FL	[%]	<b>SOR</b>	Sichtstrahlorientierung GAUR	3°[°]
<b>AB</b>	Autobahnanteil der FL	[%]	<b>SOM</b>	Sichtstrahlorientierung GAUM	3°[°]
<b>FE</b>	Lkw-Fahrfahrung	[Jahre]	<b>GVL</b>	Blickwinkeländerungsg. GAUL	[°/s]
<b>KP01</b>	Kopfspitzpunkt	3°[mm]	<b>GVR</b>	Blickwinkeländerungsg. GAUR	[°/s]
<b>KP02</b>	Mittelaugpunkt	3°[mm]	<b>GVM</b>	Blickwinkeländerungsg. GAUM	[°/s]
<b>KP03</b>	Nackenzentrum	3°[mm]	<b>GIPL</b>	Sichtzielpunkt GAUL 3D	3°[mm]
<b>KP04</b>	Schulterpunkt	3°[mm]	<b>GIPR</b>	Sichtzielpunkt GAUR 3D	3°[mm]
<b>KP05</b>	Ellenbogenpunkt	3°[mm]	<b>GIPM</b>	Sichtzielpunkt GAUM 3D	3°[mm]
<b>KP06</b>	Handgelenkpunkt	3°[mm]	<b>AOI</b>	Sichtzielklassifizierung	-
<b>KP07</b>	Mittelhandpunkt	3°[mm]	<b>KPOS</b>	Kopfposition 3D	3°[mm]
<b>KP08</b>	Halspunkt	3°[mm]	<b>KO</b>	Kopforientierung 3D	3°[°]
<b>KP09</b>	Bauchpunkt	3°[mm]	<b>HI</b>	HeadIn	-
<b>KP10</b>	Kniepunkt	3°[mm]	<b>HPC</b>	Head Position Confidence	-
<b>KP11</b>	Hüftpunkt	3°[mm]	<b>ECL</b>	EyeClosureLeft	-
<b>FP01</b>	Spiegelpunkt HSL oben	3°[mm]	<b>ECR</b>	EyeClosureRight	-
<b>FP02</b>	Spiegelpunkt HSL mitte	3°[mm]	<b>Speed</b>	Fahrzeuggeschwindigkeit	[km/h]
<b>FP03</b>	Spiegelpunkt HSL unten	3°[mm]	<b>LongAccel</b>	Längsbeschleunigung	[m/s²]
<b>FP04</b>	Spiegelpunkt WSL oben	3°[mm]	<b>LatAccel</b>	Querbewegung	[m/s²]
<b>FP05</b>	Spiegelpunkt WSL mitte	3°[mm]	<b>Steerangl</b>	Lenkwinkel	[°]
<b>FP06</b>	Spiegelpunkt WSL unten	3°[mm]	<b>SteerCount</b>	Lenkumdrehungszähler	-
<b>FP07</b>	Spiegelpunkt HSR oben	3°[mm]	<b>SteerAll</b>	Lenkgesamtswinkel	[°]
<b>FP08</b>	Spiegelpunkt HSR mitte	3°[mm]	<b>Wheelangl</b>	Radwinkel	[°]
<b>FP09</b>	Spiegelpunkt HSR unten	3°[mm]	<b>YawRate</b>	Giergeschwindigkeit	[°/s]
<b>FP10</b>	Spiegelpunkt WSR oben	3°[mm]	<b>KW</b>	Knickwinkel	[°]
<b>FP11</b>	Spiegelpunkt WSR mitte	3°[mm]	<b>LongGPS</b>	geographische Länge	[° ' "]
<b>FP12</b>	Spiegelpunkt WSR unten	3°[mm]	<b>LatGPS</b>	geographische Breite	[° ' "]
<b>FP13</b>	Lenkradmittelpunkt	3°[mm]	<b>Date</b>	Datum des Versuchs	[date]
<b>FP14</b>	Sitzpunkt vorne	3°[mm]	<b>Time</b>	Uhrzeit des Versuchs	[time]
<b>FP15</b>	Sitzpunkt hinten	3°[mm]			

## A7 Dynamische Augpunktlagenverteilungen

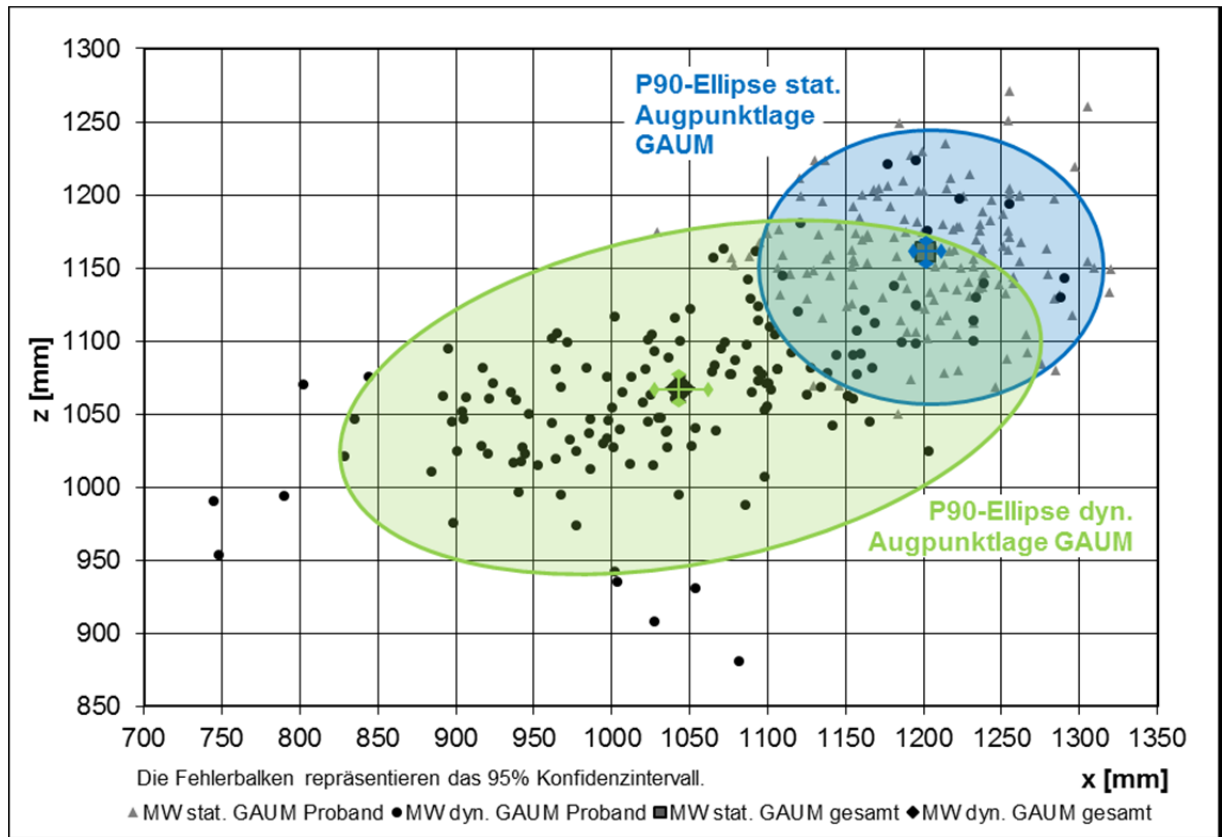


Abbildung A-8: Vergleich Mittelwerte stat./dyn. Augpunktlagen (V1-V3; N = 152) Seitenansicht

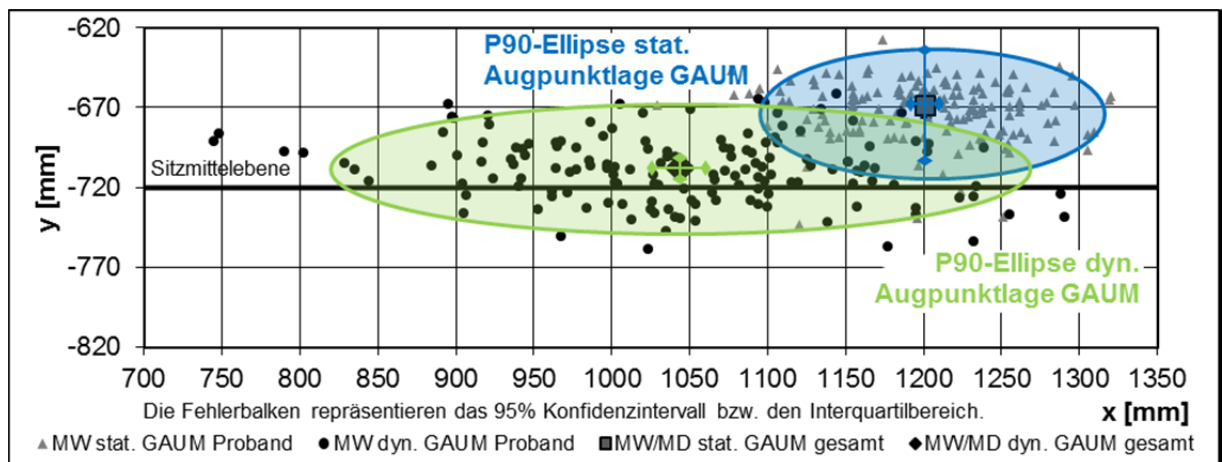


Abbildung A-9: Vergleich Mittelwerte stat./dyn. Augpunktlagen (V1-V3; N = 152) Draufsicht

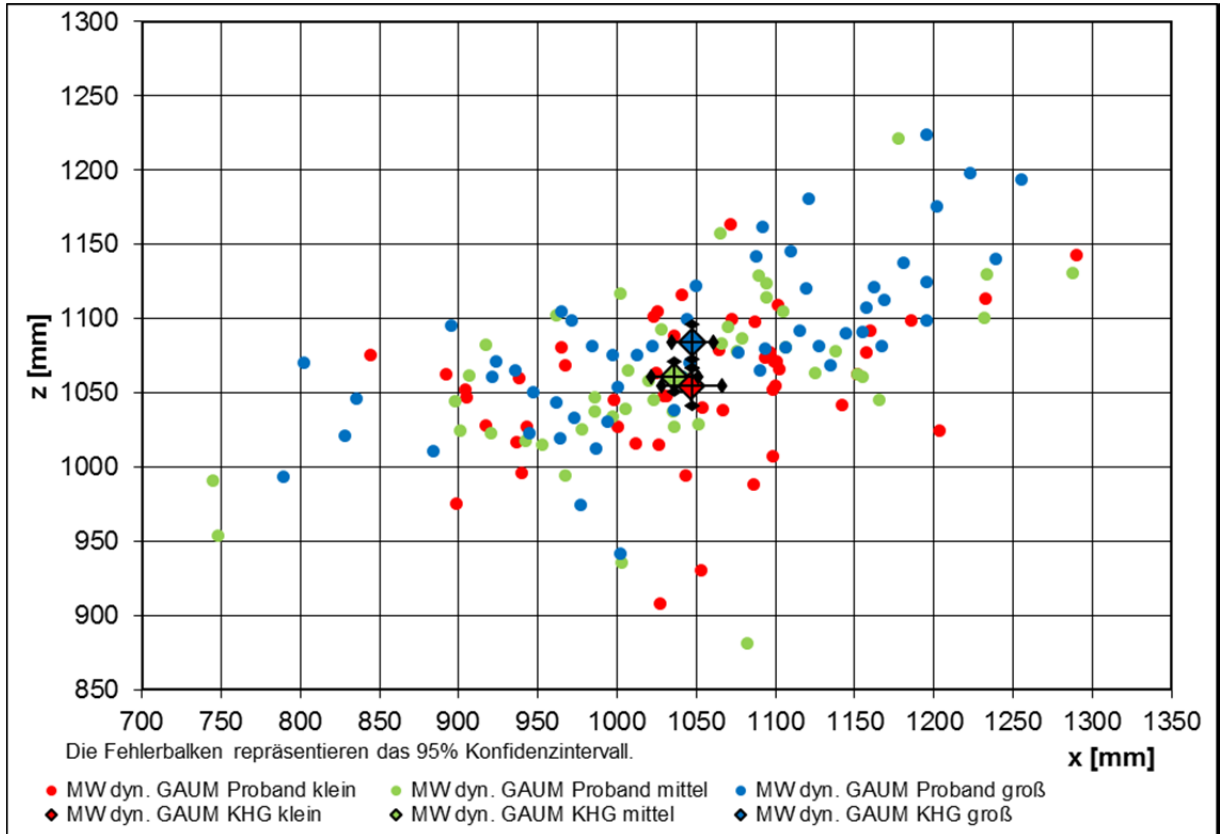


Abbildung A-10: Einfluss der Körperhöhe auf dyn. Augpunktlagen V1-V3 N = 152 Seitenansicht

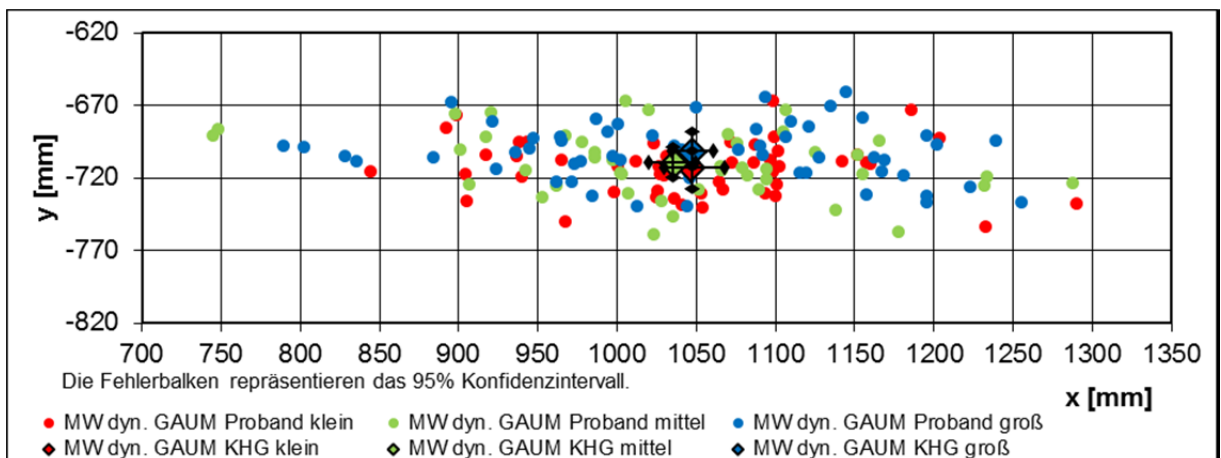


Abbildung A-11: Einfluss der Körperhöhe auf dyn. Augpunktlagen V1-V3 N = 152 Draufsicht

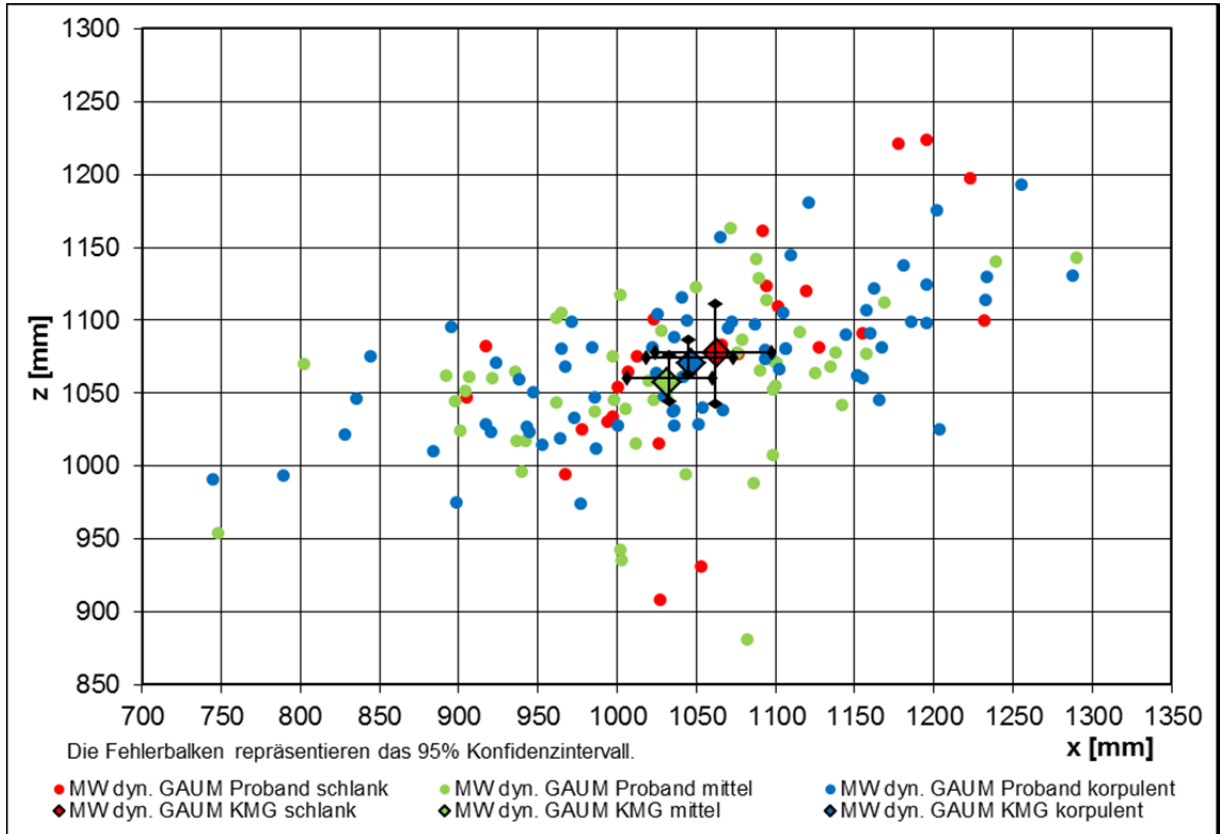


Abbildung A-12: Einfluss des Taillenumfangs auf dyn. Ausgangslagen V1-V3 N = 152 Seitenansicht

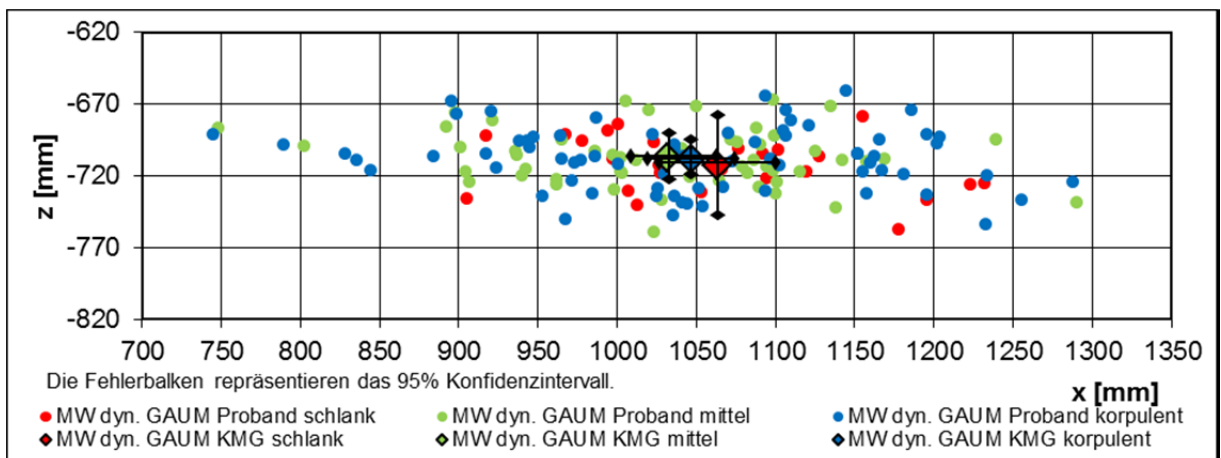


Abbildung A-13: Einfluss des Taillenumfangs auf dyn. Ausgangslagen V1-V3 N = 152 Draufsicht



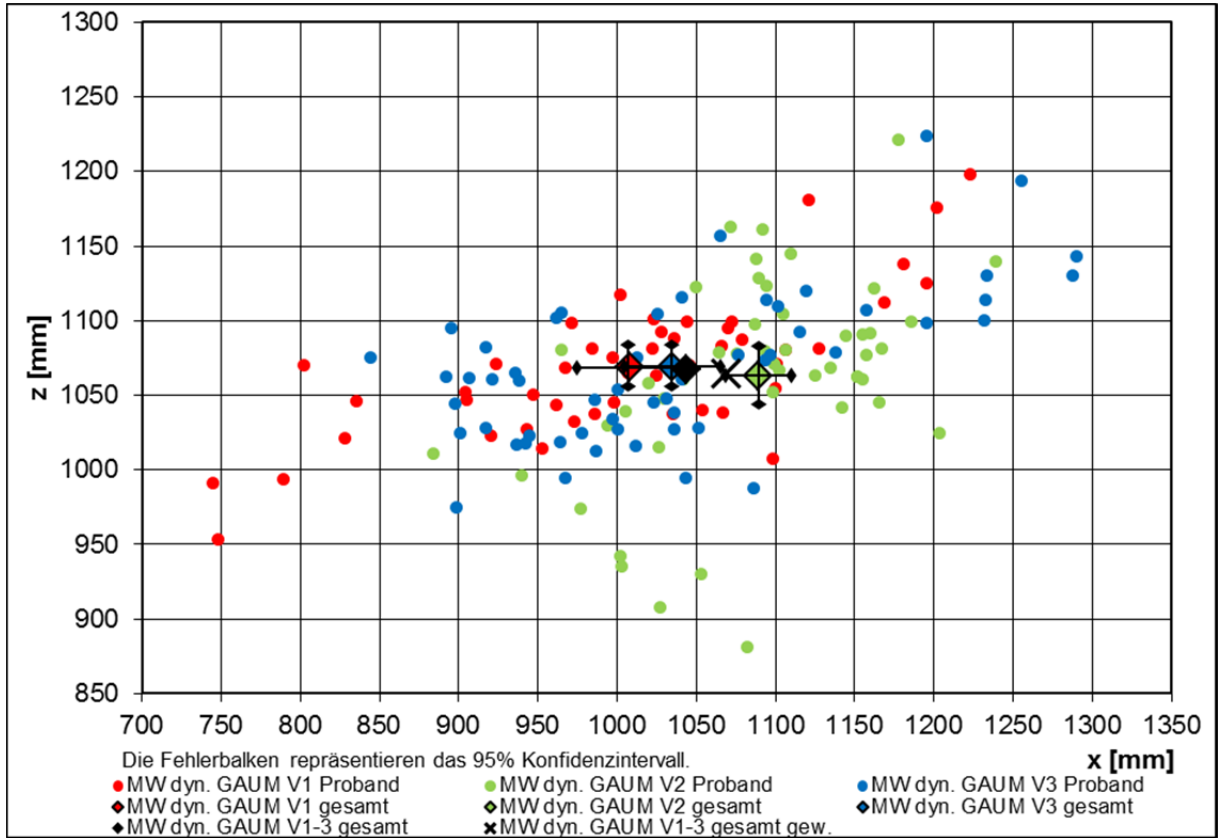


Abbildung A-14: Einfluss der Fahrzeugvariante auf dyn. Augpunktlagen V1-V3 N = 152 Seitenansicht

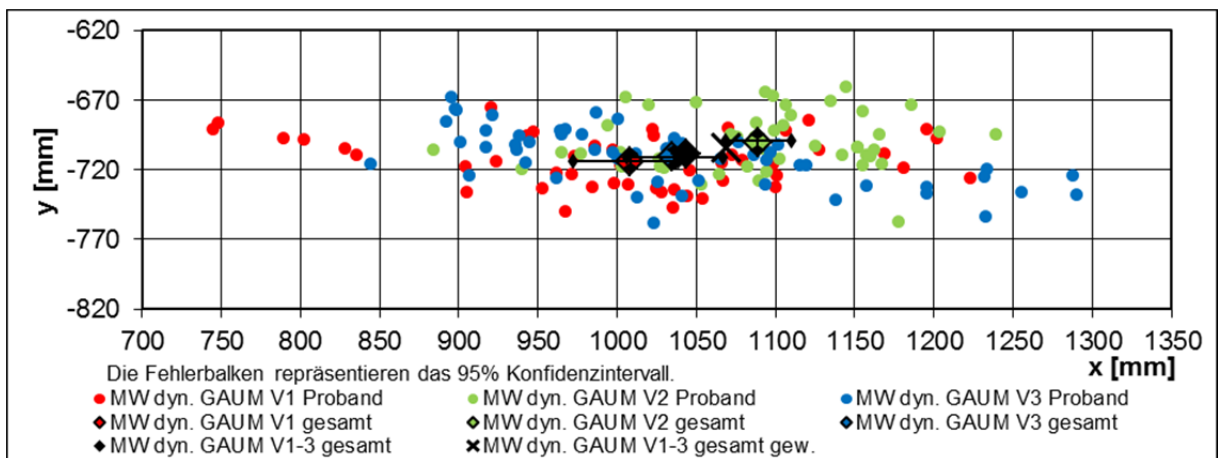


Abbildung A-15: Einfluss der Fahrzeugvariante auf dyn. Augpunktlagen V1-V3 N=152 Draufsicht

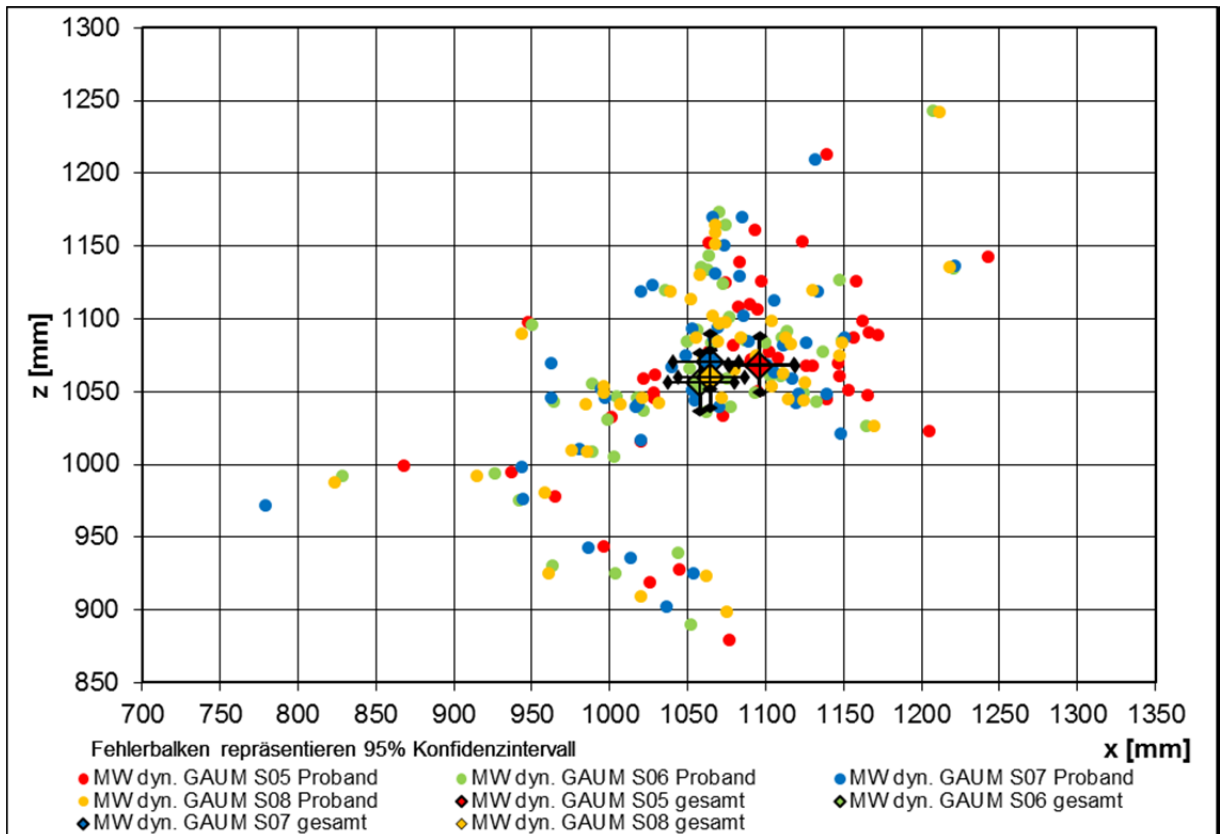


Abbildung A-16: Einfluss der Sichtsituation S05-S08 auf dyn. Augpunktlagen V2 N = 46 Seitenansicht

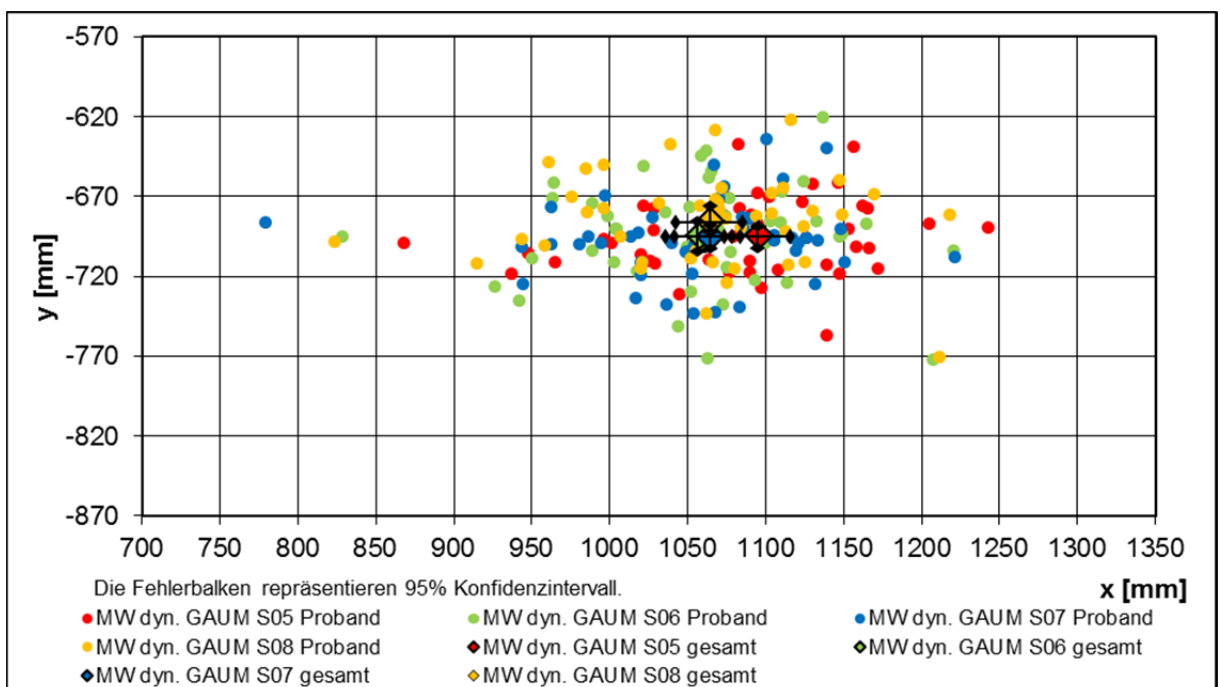


Abbildung A-17: Einfluss der Sichtsituation S05-S08 auf dyn. Augpunktlagen V2 N = 46 Draufsicht

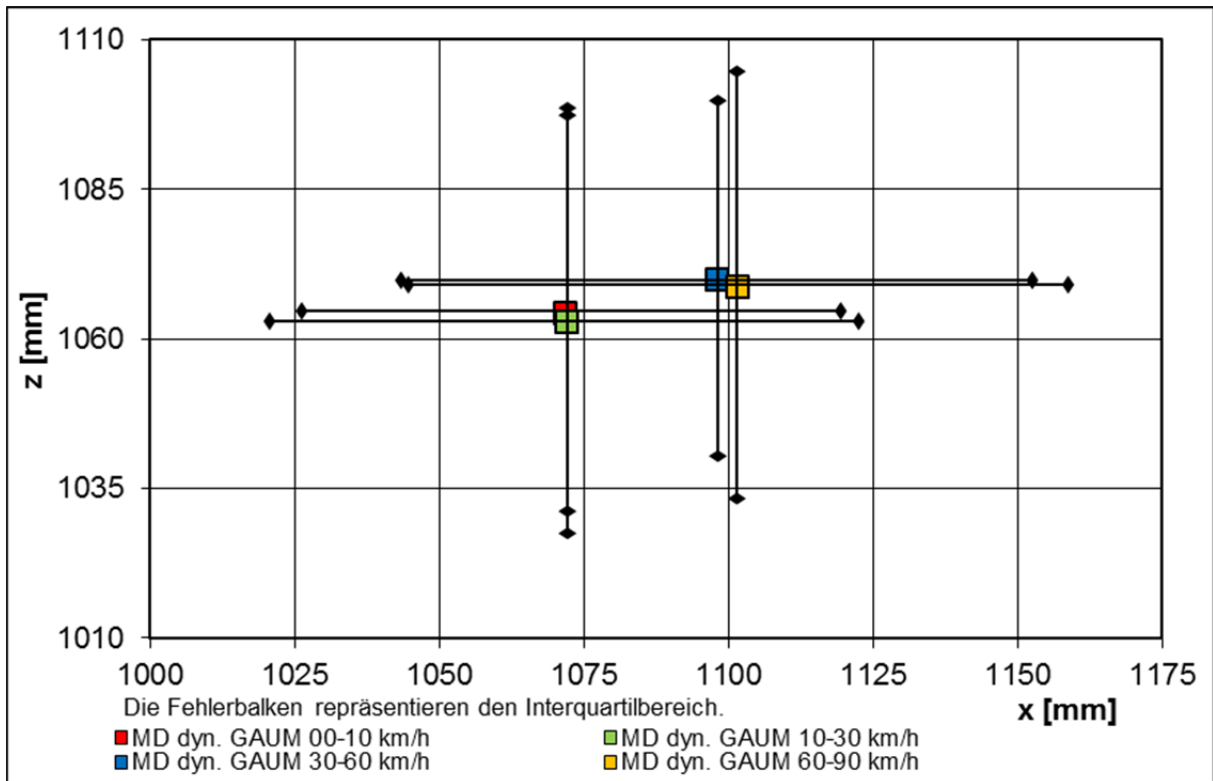


Abbildung A-18: Einfluss der Geschwindigkeit auf dyn. Augpunktlagen V2 n = 46 Seitenansicht

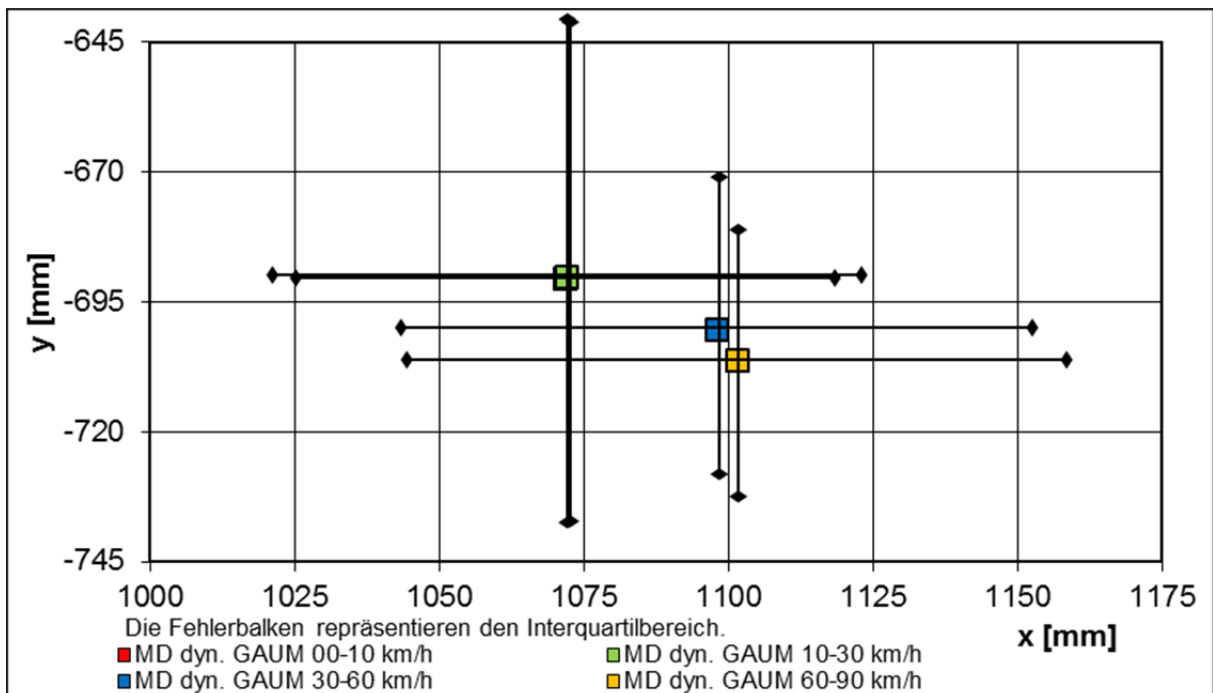


Abbildung A-19: Einfluss der Geschwindigkeit auf dyn. Augpunktlagen V2 n = 46 Draufsicht

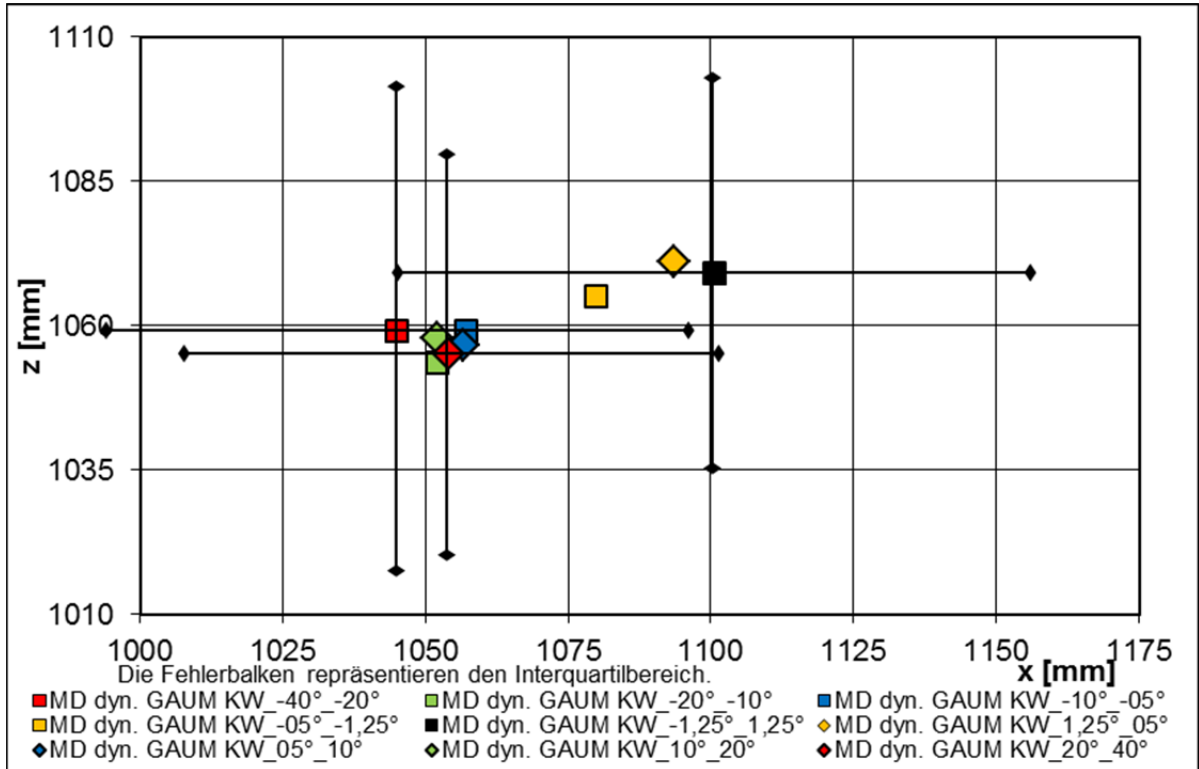


Abbildung A-20: Einfluss des Knickwinkels auf dyn. Augpunktlagen V2 n = 46 Seitenansicht

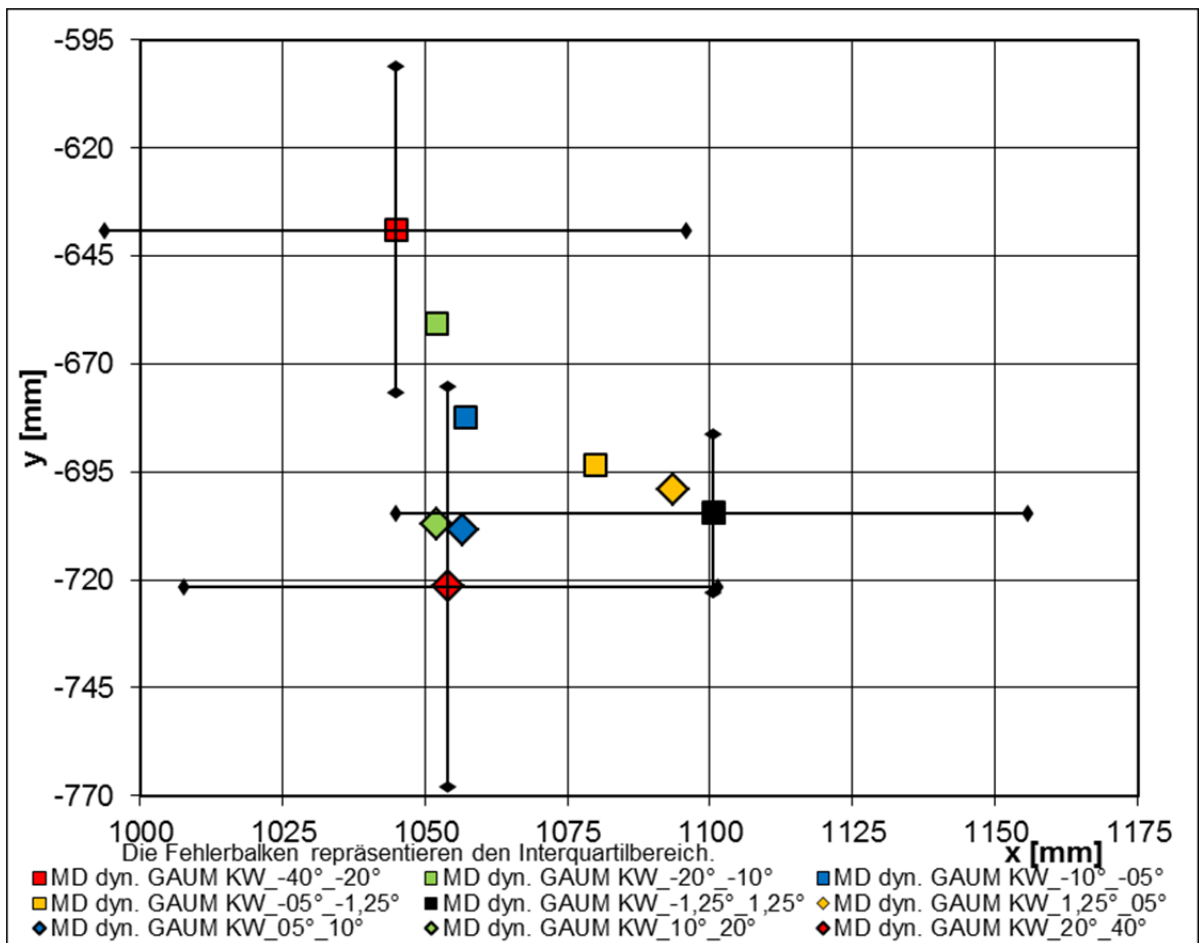


Abbildung A-21: Einfluss des Knickwinkels auf dyn. Augpunktlagen V2 n = 46 Draufsicht



## A8 Ergebnisse der empirischen Tests

Tabelle A-7: Ergebnisse der t-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H1)

Vergleich	Mittelwertdifferenz [mm]	Standardabweichung (gemittelt) [mm]	Signifikanz (zweiseitig)	Effektstärke (Cohen's d)
MW stat. GAUM gesamt x – MW dyn. GAUM gesamt x	157,39	83,15	< 0,001	1,89
MW stat. GAUM gesamt z – MW dyn. GAUM gesamt z	94,36	50,27	< 0,001	1,87

Tabelle A-8: Ergebnisse des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H1)

Vergleich	Mediandifferenz [mm]	Interquartilbereich (gemittelt) [mm]	Signifikanz (zweiseitig)	Effektstärke (r)
MD stat. GAUM gesamt y – MD dyn. GAUM gesamt y	39,33	25,61	< 0,001	0,59

Tabelle A-9: Ergebnisse der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H2)

Vergleich	Mediandifferenz [mm]	Interquartilbereich (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (r)
MD stat. Offset MW stat. GAUM gesamt x – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM gesamt x	25,46	66,15	< 0,001	0,56
MD stat. Offset MW stat. GAUM gesamt y – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM gesamt y	2,66	16,10	< 0,001	0,49
MD stat. Offset MW stat. GAUM gesamt z – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM gesamt z	6,38	36,43	< 0,001	0,52
MD stat. Offset MW stat. GAUM gesamt 3D – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM gesamt 3D	32,04	60,97	< 0,001	0,60

Tabelle A-10: Ergebnisse des t-Tests für unabhängige Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H3)

Vergleich	Mittelwertdifferenz [mm]	Standardabweichung (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (Cohen's d)
MW dyn. GAUM KHG klein z – MW dyn. GAUM KHG groß z	29,46	51,91	0,002	0,57

Tabelle A-11: Ergebnisse der t-Tests für unabhängige Stichproben zur explorativen Untersuchung des Einflusses der Körperhöhe auf die Augpunktlagenhöhe

Vergleich	Mittelwertdifferenz [mm]	Standardabweichung (gemittelt) [mm]	Signifikanz (zweiseitig)	Effektstärke (Cohen's d)
MW dyn. GAUM KHG klein z – MW dyn. GAUM KHG mittel z	5,80	52,94	0,593	-
MW dyn. GAUM KHG mittel z – MW dyn. GAUM KHG groß z	23,66	56,50	0,076	-

Tabelle A-12: Ergebnisse der GT2-Tests nach Hochberg zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H5)

Vergleich	Mittelwertdifferenz [mm]	Standardabweichung (gemittelt) [mm]	Signifikanz (zweiseitig)	Effektstärke (Cohen's d)
MW dyn. GAUM V1 gesamt x - MW dyn. GAUM V2 gesamt x	80,67	95,15	<0,001	0,85
MW dyn. GAUM V1 gesamt x - MW dyn. GAUM V3 gesamt x	26,84	112,66	0,452	-
MW dyn. GAUM V2 gesamt x - MW dyn. GAUM V3 gesamt x	53,85	95,27	0,023	0,57
MW dyn. GAUM V1 gesamt y - MW dyn. GAUM V2 gesamt y	13,90	19,26	0,002	0,72
MW dyn. GAUM V1 gesamt y - MW dyn. GAUM V3 gesamt y	3,16	19,39	0,800	-
MW dyn. GAUM V2 gesamt y - MW dyn. GAUM V3 gesamt y	10,74	20,17	0,018	0,53

Tabelle A-13: Ergebnisse der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H6)

Vergleich	Mediandifferenz [mm]	Interquartilbereich (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (r)
MD Blicke in Spiegel norm. S05 – MD Blicke in Spiegel norm. S06	0,019	0,031	< 0,001	0,58
MD Blicke in Spiegel norm. S05 – MD Blicke in Spiegel norm. S07	0,026	0,031	< 0,001	0,52
MD Blicke in Spiegel norm. S05 – MD Blicke in Spiegel norm. S08	0,009	0,011	< 0,001	0,44

Tabelle A-14: Ergebnisse der t-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H7)

Vergleich	Mittelwertdifferenz [mm]	Standardabweichung (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (Cohen's d)
MW dyn. GAUM S05 gesamt x – MW dyn. GAUM S06 gesamt x	27,34	73,71	< 0,001	0,37
MW dyn. GAUM S05 gesamt x – MW dyn. GAUM S07 gesamt x	28,51	73,25	< 0,001	0,39
MW dyn. GAUM S05 gesamt x – MW dyn. GAUM S08 gesamt x	24,66	74,09	< 0,001	0,33

Tabelle A-15: Ergebnisse der t-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H8)

Vergleich	Mittelwertdifferenz [mm]	Standardabweichung (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (Cohen's d)
MW dyn. GAUM S10 gesamt x – MW dyn. GAUM S02 gesamt x	37,93	78,96	0,005	0,48
MW dyn. GAUM S10 gesamt x – MW dyn. GAUM S06 gesamt x	36,58	73,18	0,005	0,44

Tabelle A-16: Ergebnisse der t-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H9)

Vergleich	Mittelwert-differenz [mm]	Standardabweichung (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (Cohen's d)
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 x – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S06 x	16,18	9,28	< 0,001	1,74
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 x – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S08 x	13,56	8,09	< 0,001	1,65
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 y – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S06 y	21,95	8,93	< 0,001	2,46
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 y – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S07 y	18,63	8,61	< 0,001	2,16
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 y – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S08 y	16,26	8,02	< 0,001	2,03
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 3D MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S06 3D	31,12	11,43	< 0,001	2,72
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 3D MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S07 3D	28,09	12,46	< 0,001	2,25
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 3D MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S08 3D	24,23	11,15	< 0,001	2,17

Tabelle A-17: Ergebnisse der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H9)

Vergleich	Mediandifferenz [mm]	Interquartilbereich (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (r)
MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 x – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S07 x	11,49	8,36	< 0,001	0,61
MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 z – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S06 z	5,63	6,93	< 0,001	0,53
MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 z – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S07 z	3,95	7,69	< 0,001	0,53
MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S05 z – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S08 z	4,81	8,02	< 0,001	0,52

Tabelle A-18: Ergebnisse der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H10)

Vergleich	Mediandifferenz [mm]	Interquartilbereich (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (r)
MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S10 x – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S02 x	14,27	13,73	< 0,001	0,50
MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S10 x – MD dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S06 x	13,74	13,15	< 0,001	0,59

Tabelle A-19: Ergebnisse der t-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H10)

Vergleich	Mittelwert-differenz [mm]	Standardabweichung (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (Cohen's d)
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S10 y – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S02 y	14,64	9,75	< 0,001	1,50
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S10 y – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S06 y	14,03	9,14	< 0,001	1,53
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S10 z – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S02 z	2,40	9,58	0,180	-
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S10 z – MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S06 z	1,70	10,32	0,231	-
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S10 3D MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S02 3D	20,16	15,52	< 0,001	1,30
MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S10 3D MW dyn. Offset MW dyn. GAUM Proband S06 3D	20,26	14,83	< 0,001	1,37

Tabelle A-20: Ergebnisse der Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H11)

Vergleich	Mediandifferenz [°]	Interquartilbereich (gemittelt) [°]	Signifikanz (zweiseitig)	Effektstärke (r)
MD dyn. Knickwinkel Intervall > P90 S05 – MD dyn. Knickwinkel Intervall > P90 S06	24,54	0,78	< 0,001	0,86
MD dyn. Knickwinkel Intervall > P90 S05 – MD dyn. Knickwinkel Intervall > P90 S07	24,75	1,89	< 0,001	0,86
MD dyn. Knickwinkel Intervall > P90 S05 – MD dyn. Knickwinkel Intervall > P90 S08	16,95	0,78	< 0,001	0,86

Tabelle A-21: Ergebnisse der Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H12)

Vergleich	Mediandifferenz [km/h]	Interquartilbereich (gemittelt) [km/h]	Signifikanz (zweiseitig)	Effektstärke (r)
MD dyn. Knickwinkel S05 – MD dyn. Knickwinkel S06	40,62	15,38	< 0,001	0,78
MD dyn. Knickwinkel S05 – MD dyn. Knickwinkel S07	50,73	20,66	< 0,001	0,81
MD dyn. Knickwinkel S05 – MD dyn. Knickwinkel S08	29,39	22,05	< 0,001	0,46

Tabelle A-22: Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H14)

Vergleich	Mediandifferenz [mm]	Interquartilbereich (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (r)
MD dyn. GAUM 10-30 km/h x – MD dyn. GAUM 60-90 km/h x	29,55	108,01	< 0,001	0,15



Tabelle A-23: Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige zur Abhängigkeit der y-Position der dynamischen Augpunktlage von der Fahrzeuggeschwindigkeit

Vergleich	Mediandifferenz [mm]	Interquartilbereich (gemittelt) [mm]	Signifikanz (zweiseitig)	Effektstärke (r)
MD dyn. GAUM 10-30 km/h y – MD dyn. GAUM 60-90 km/h y	16,22	49,79	< 0,001	0,14

Tabelle A-24: Ergebnisse der Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H15)

Vergleich	Mediandifferenz [mm]	Interquartilbereich (gemittelt) [mm]	Signifikanz (einseitig)	Effektstärke (r)
MD dyn. GAUM KW_-40°_-20° x – MD dyn. GAUM KW_-1,25°_1,25° x	55,57	106,35	< 0,001	0,06
MD dyn. GAUM KW_20°_40° x – MD dyn. GAUM KW_-1,25°_1,25° x	46,39	102,13	< 0,001	0,08

Tabelle A-25: Ergebnisse der Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige zur Abhängigkeit der y-Position der dynamischen Augpunktlage von der Fahrzeuggeschwindigkeit

Vergleich	Mediandifferenz [mm]	Interquartilbereich (gemittelt) [mm]	Signifikanz (zweiseitig)	Effektstärke (r)
MD dyn. GAUM KW_-40°_-20° y – MD dyn. GAUM KW_-1,25°_1,25° y	65,43	55,72	< 0,001	0,09
MD dyn. GAUM KW_20°_40° y – MD dyn. GAUM KW_-1,25°_1,25° y	17,02	59,76	< 0,001	0,06

## A9 Dynamische Sichtbereiche der indirekten Sicht

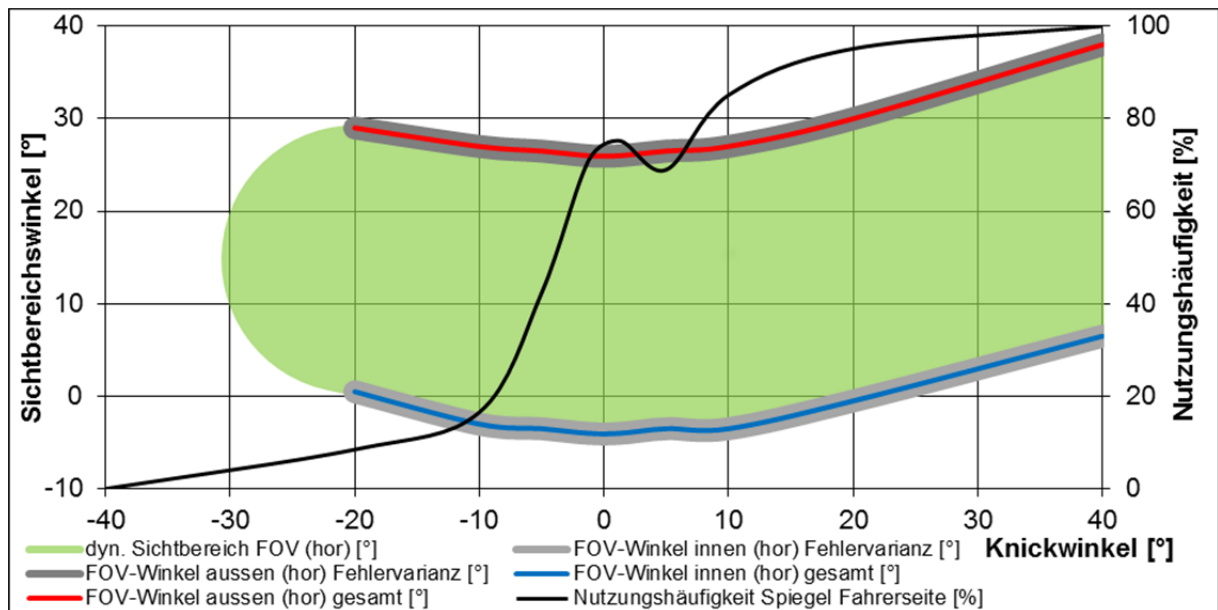


Abbildung A-22: Genutzte horizontale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen V2 Spiegel Klasse II Fahrerseite

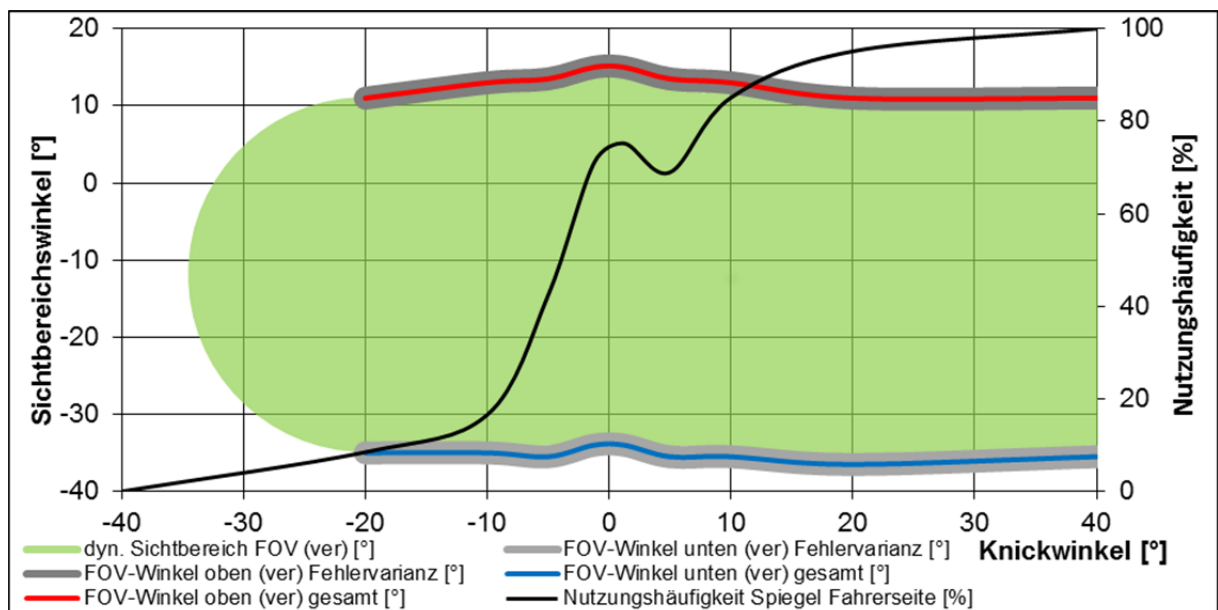


Abbildung A-23: Genutzte vertikale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen V2 Spiegel Klasse II Fahrerseite

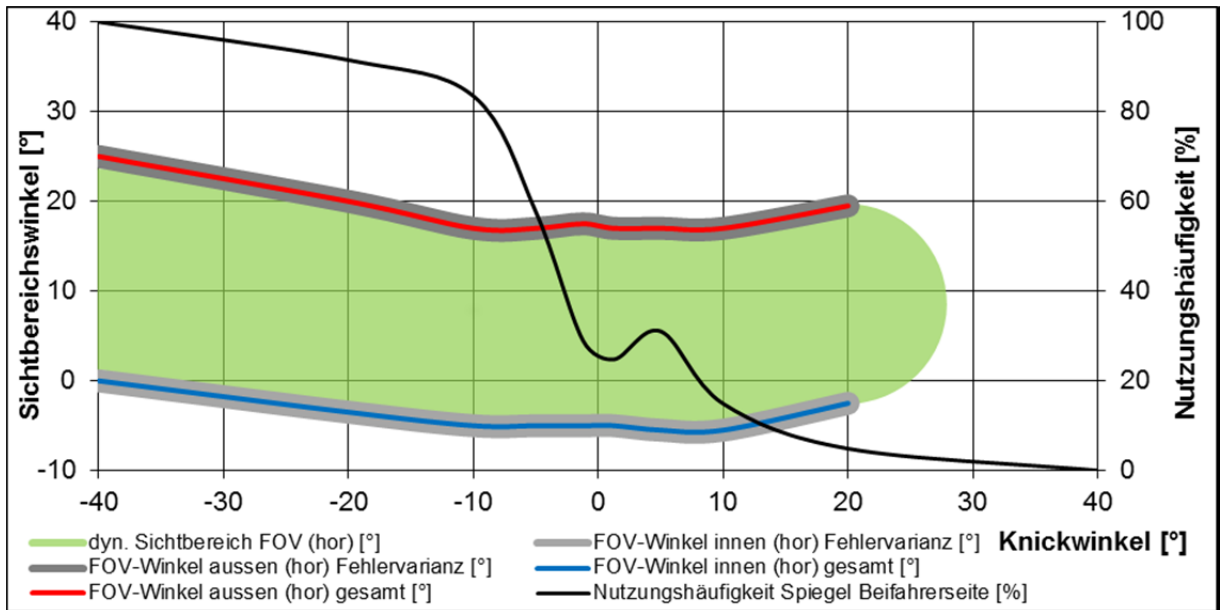


Abbildung A-24: Genutzte horizontale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen V2 Spiegel Klasse II Beifahrerseite

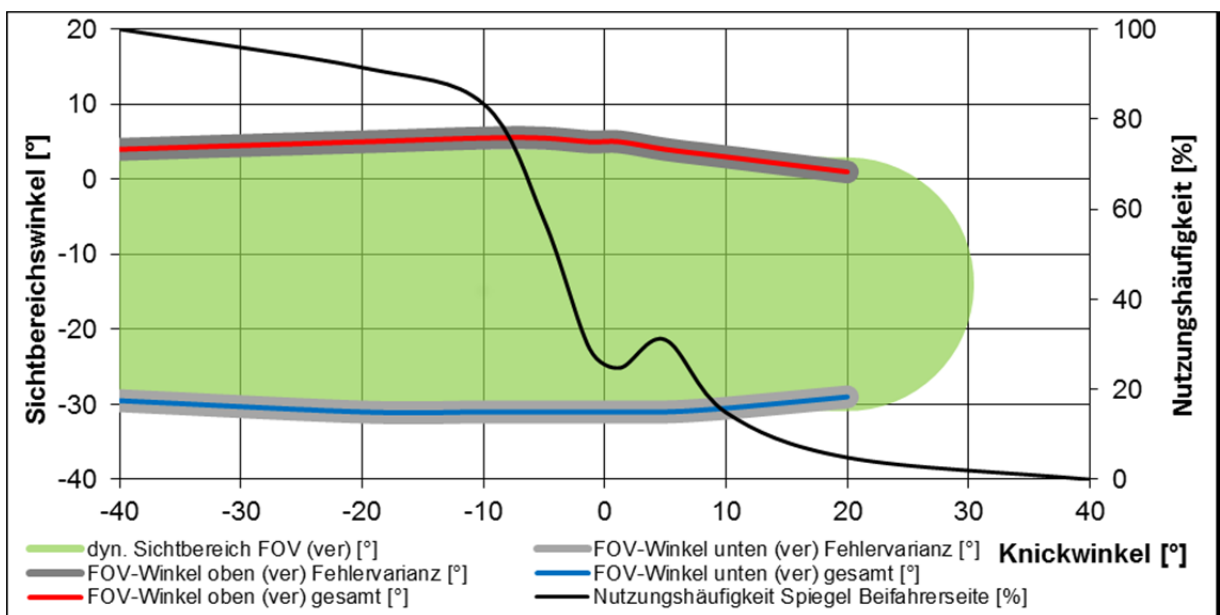


Abbildung A-25: Genutzte vertikale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen V2 Spiegel Klasse II Beifahrerseite

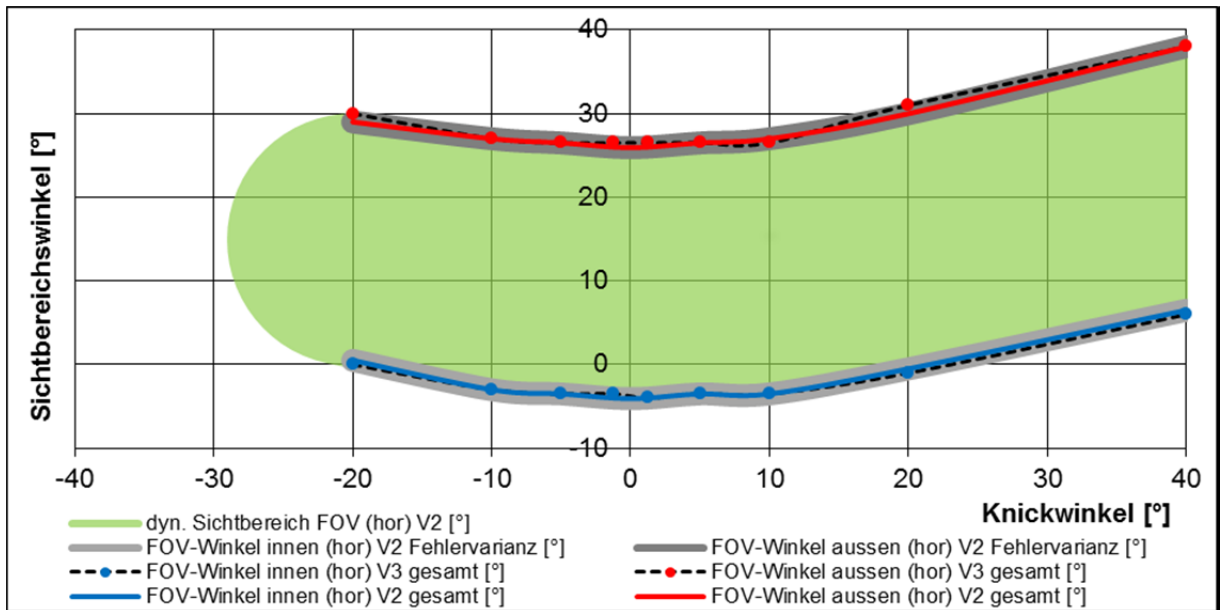


Abbildung A-26: Genutzte horizontale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen Spiegel Klasse II Fahrerseite V2-V3

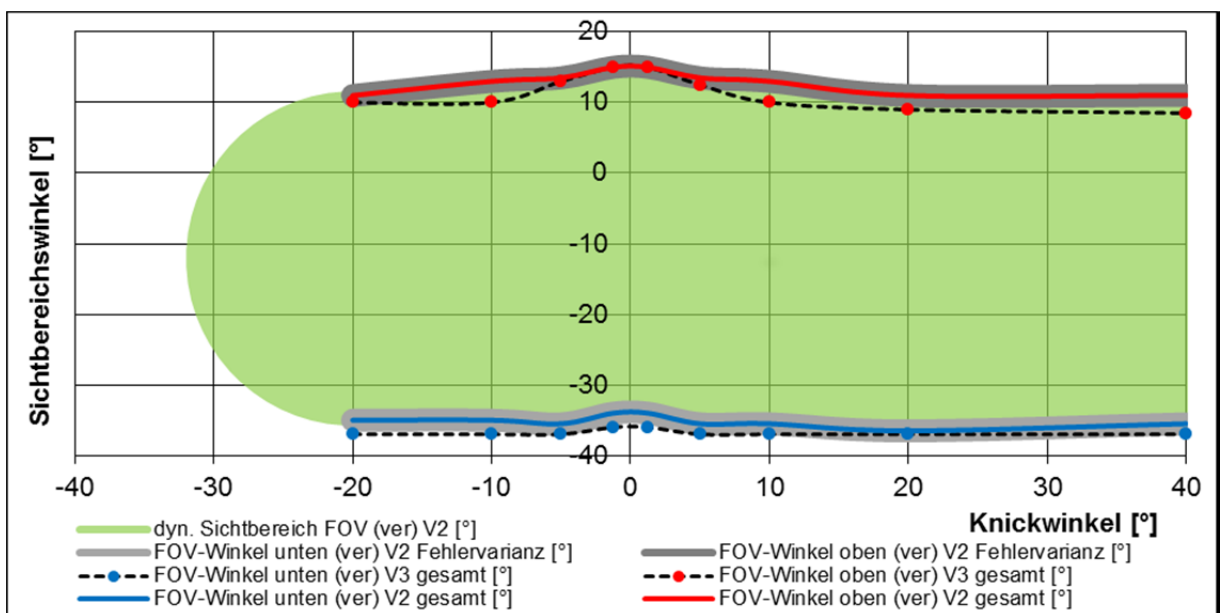


Abbildung A-27: Genutzte vertikale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen Spiegel Klasse II Fahrerseite V2-V3



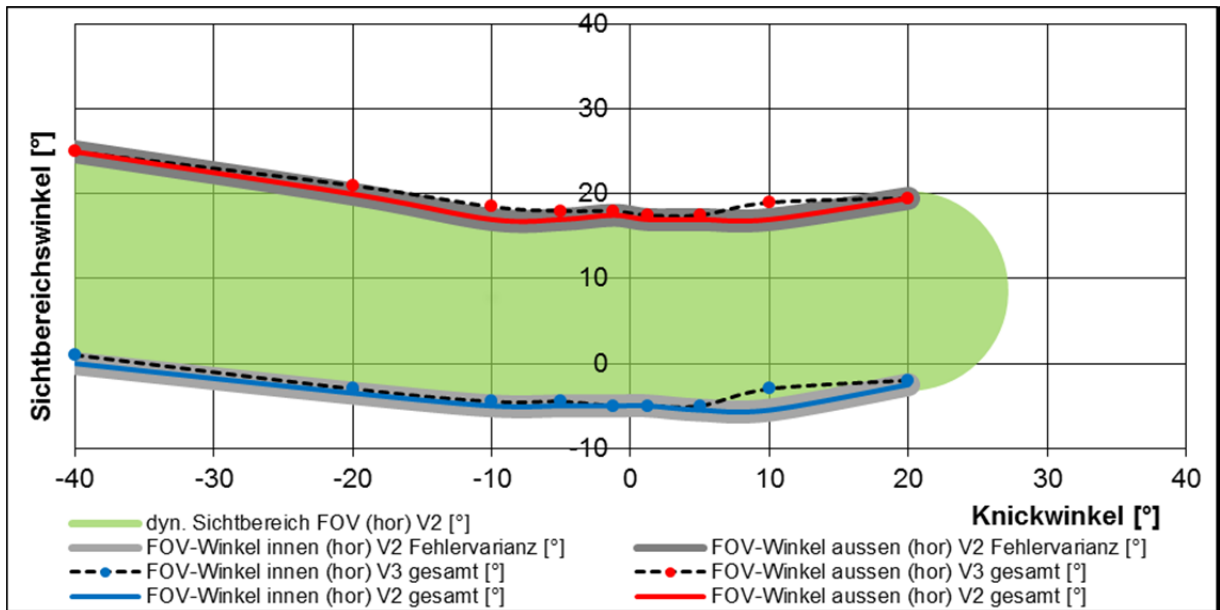


Abbildung A-28: Genutzte horizontale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen Spiegel Klasse II Beifahrerseite V2-V3

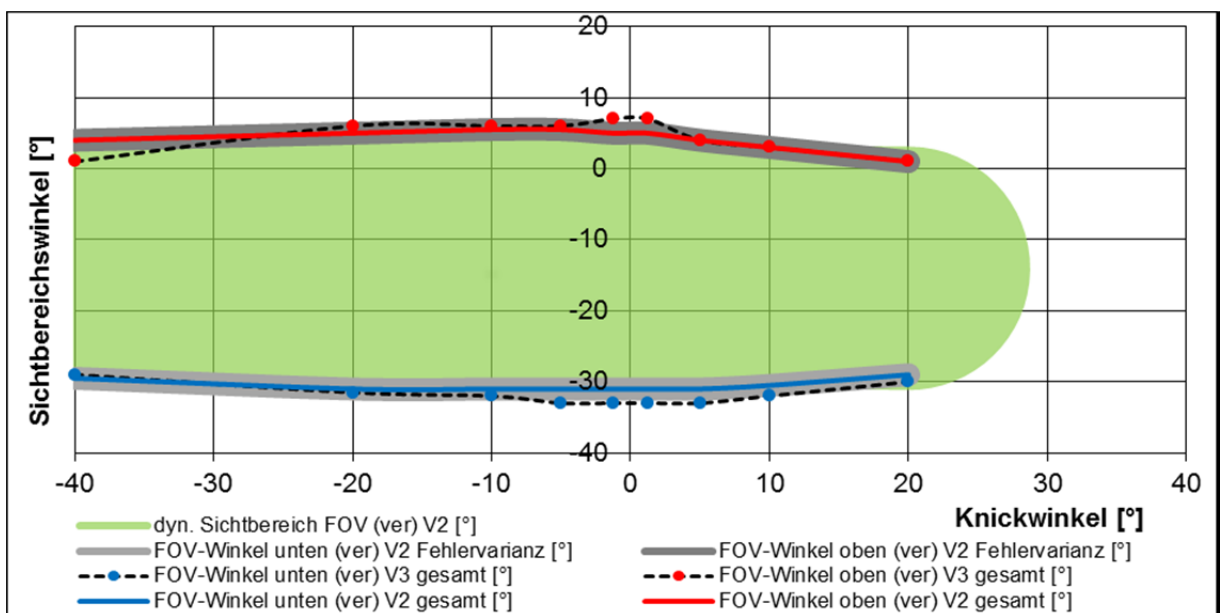


Abbildung A-29: Genutzte vertikale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen Spiegel Klasse II Beifahrerseite V2-V3

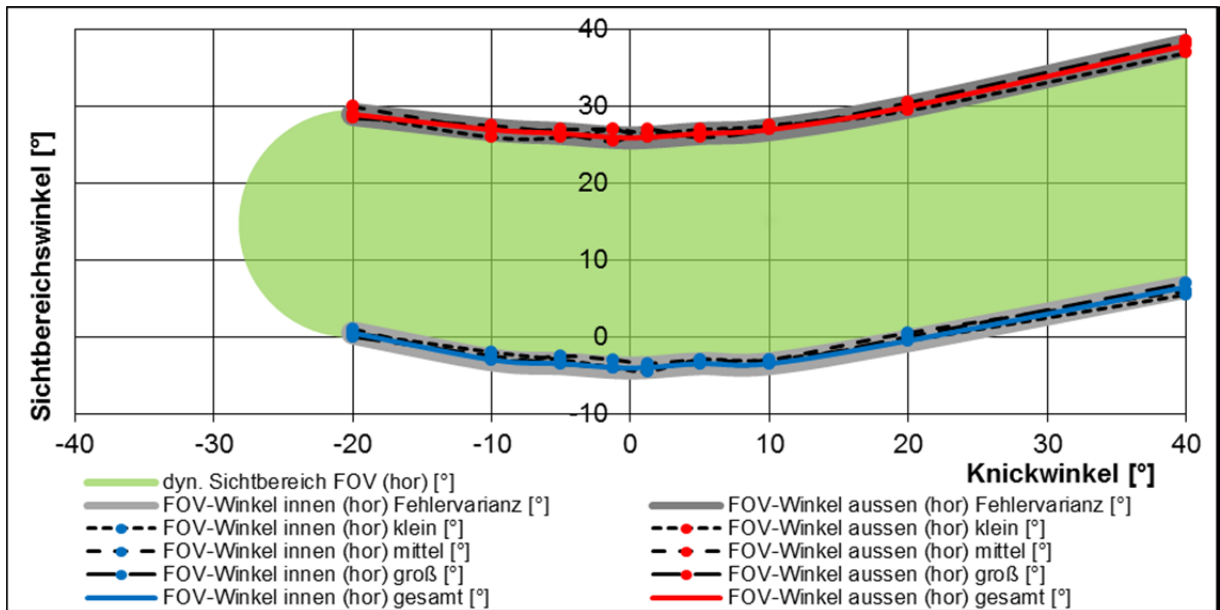


Abbildung A-30: Genutzte horizontale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen Spiegel Klasse II Fahrerseite KHG

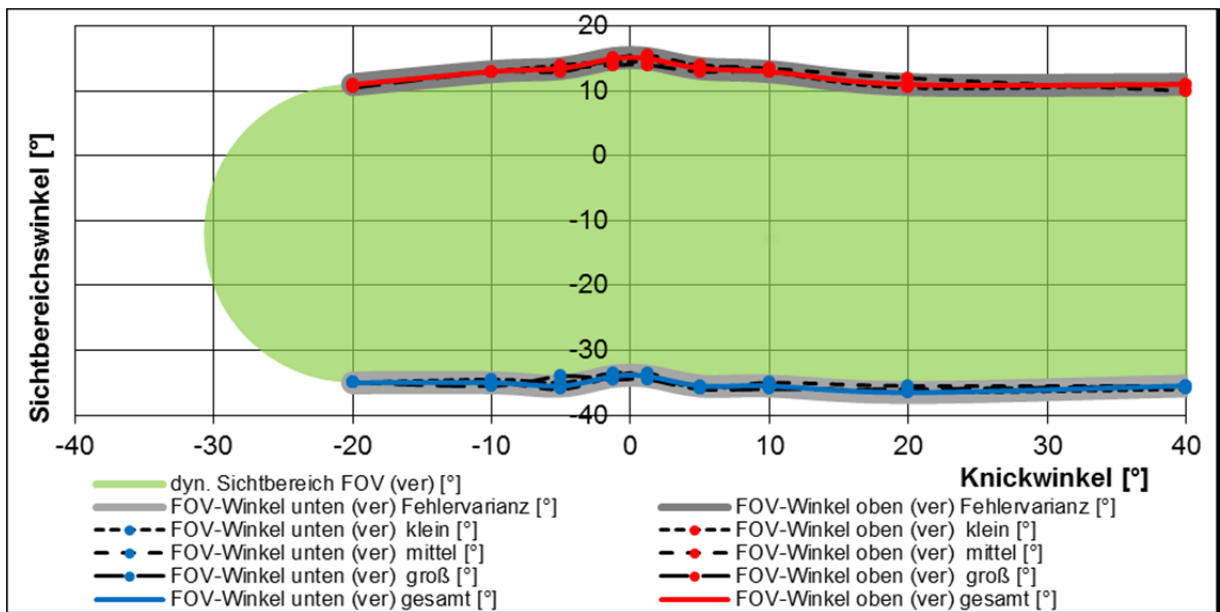


Abbildung A-31: Genutzte vertikale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen Spiegel Klasse II Fahrerseite KHG

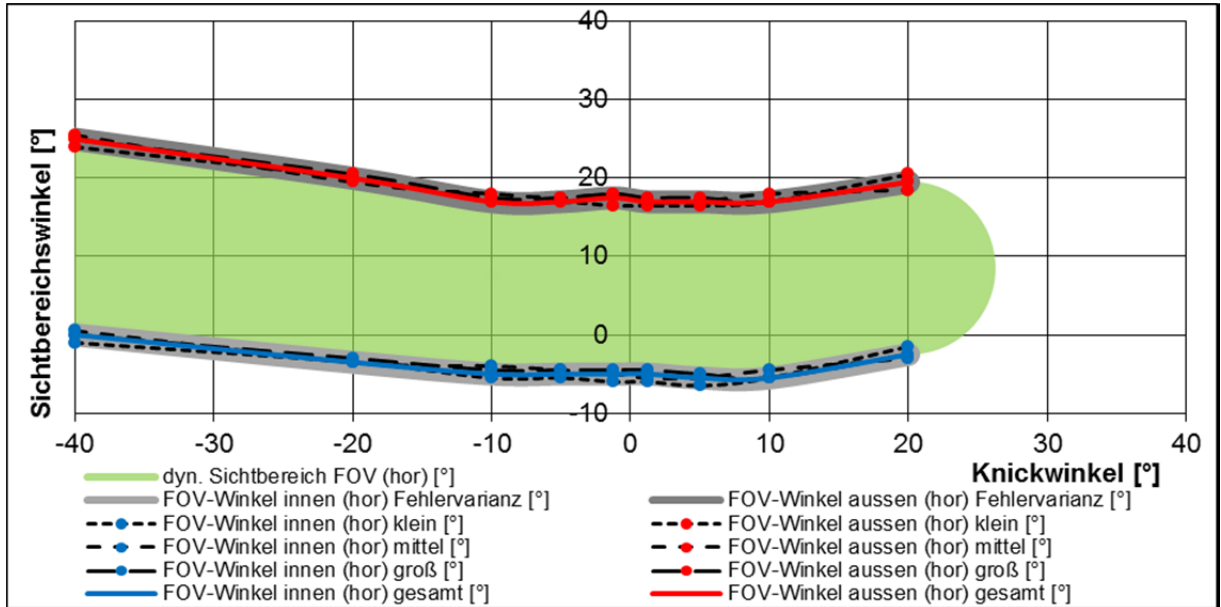


Abbildung A-32: Genutzte horizontale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen Spiegel Klasse II Beifahrerseite KHG

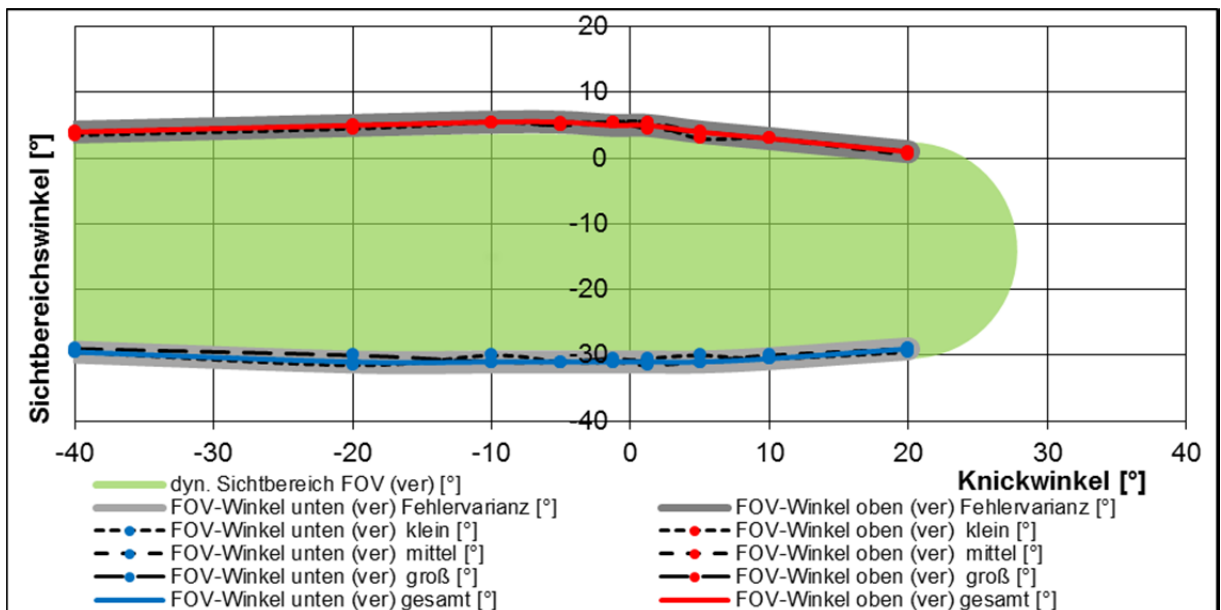


Abbildung A-33: Genutzte vertikale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen Spiegel Klasse II Beifahrerseite KHG

## A10 Augellipsoid der dynamischen Augpunktlagen

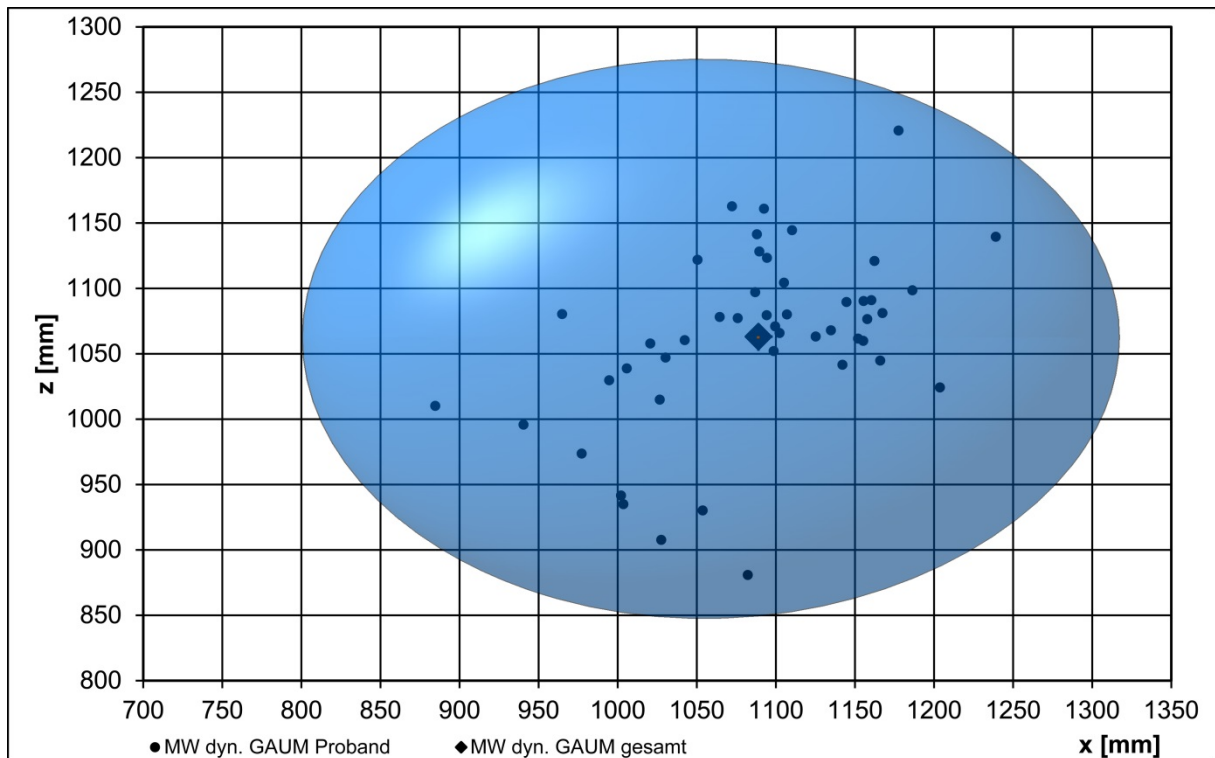


Abbildung A-34: Mittelwerte und Augellipsoid zur Beschreibung der dynamischen Augpunktlagen V2  
n = 46 (Seitenansicht)

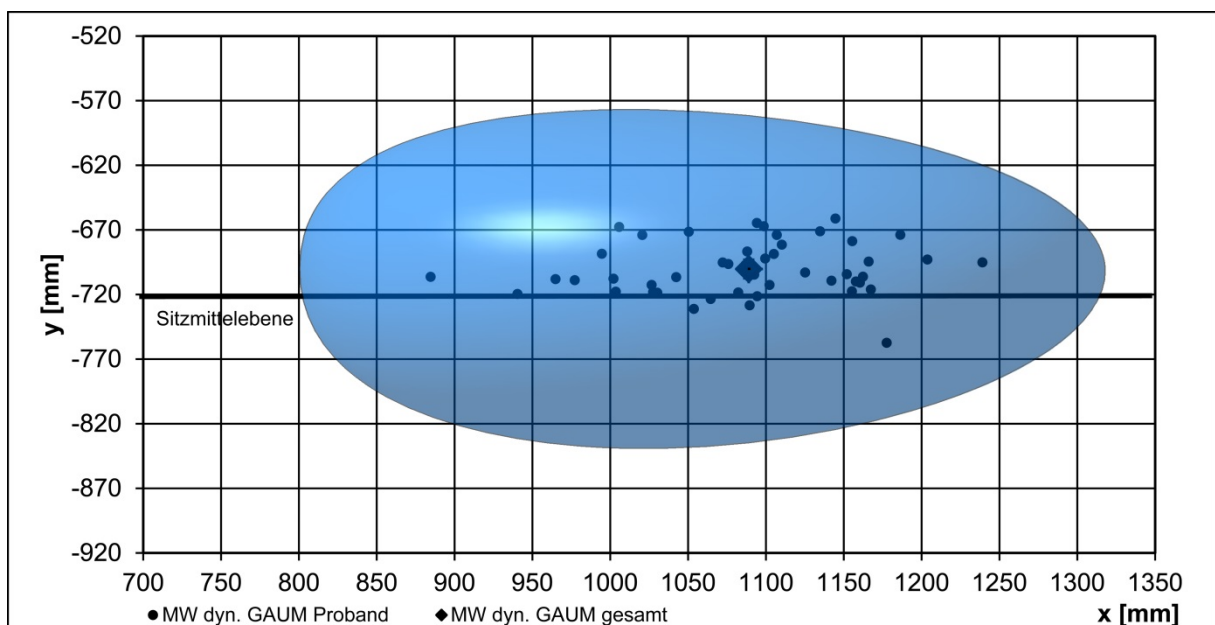


Abbildung A-35: Mittelwerte und Augellipsoid zur Beschreibung der dynamischen Augpunktlagen V2  
n = 46 (Draufsicht)

## A11 Verschiebekennlinien des Kamera-Monitor-Systems

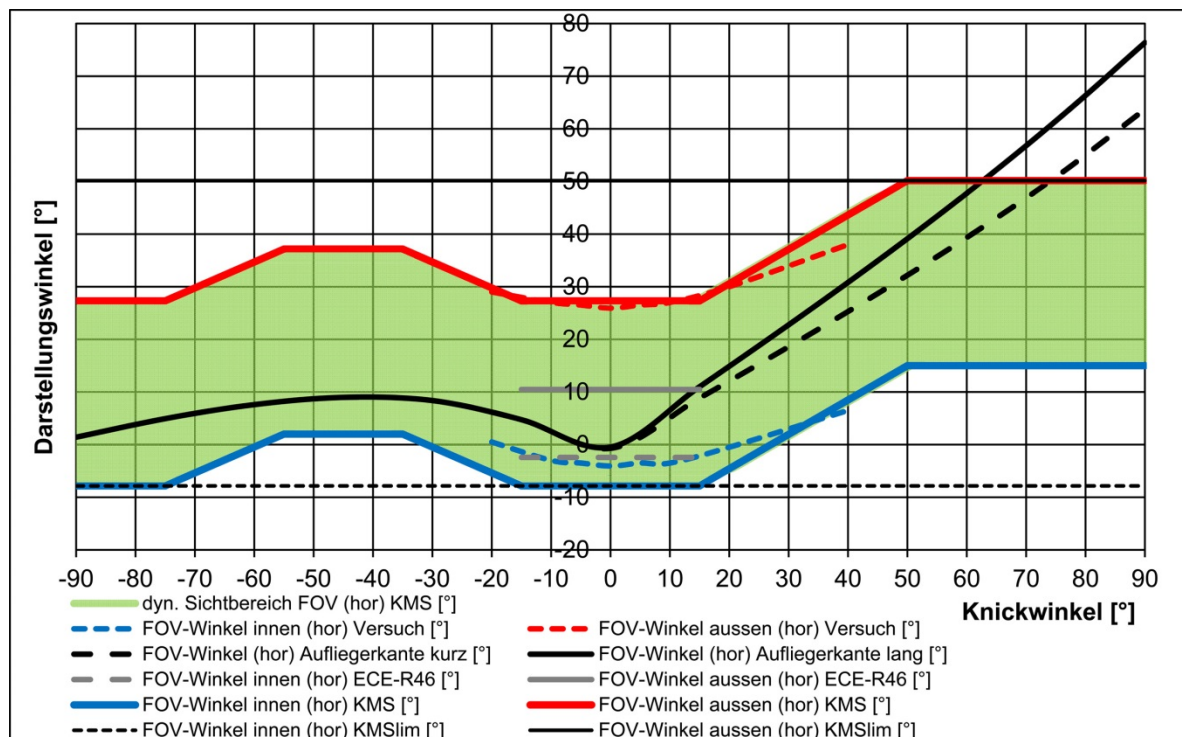


Abbildung A-36: Horizontale Verschiebekennlinie des KMS Klasse II Fahrerseite

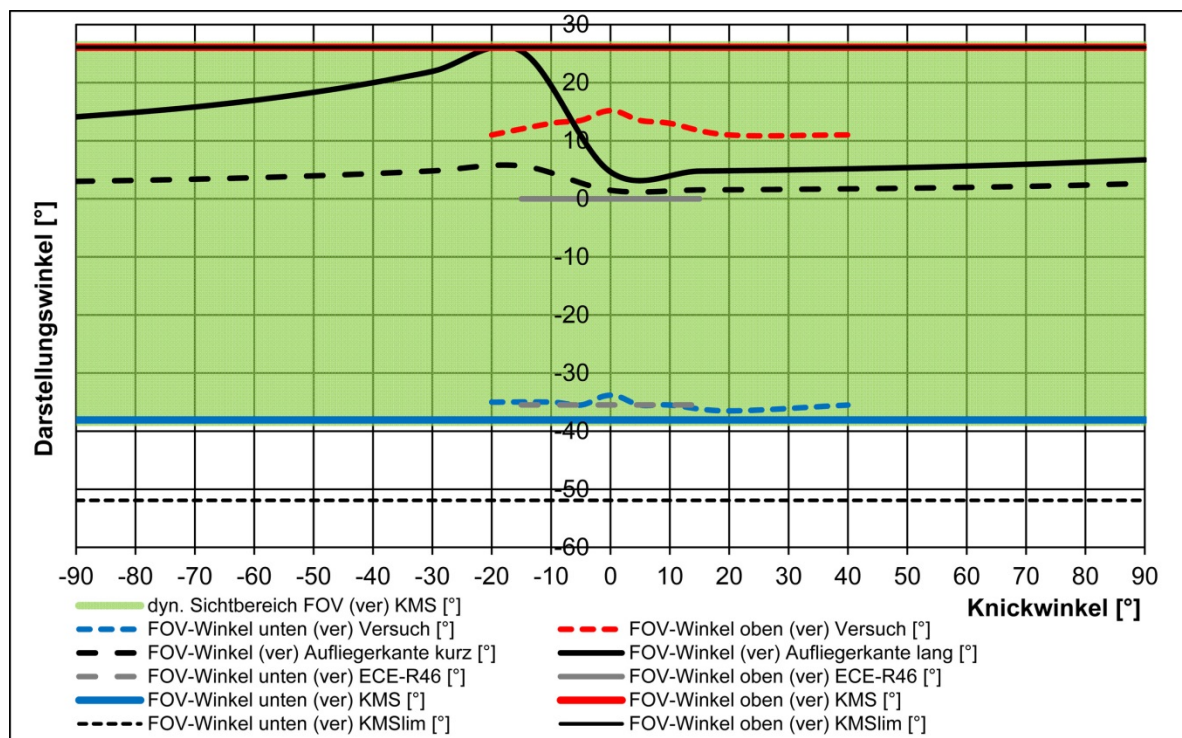


Abbildung A-37: Vertikale Verschiebekennlinie des KMS Klasse II Fahrerseite



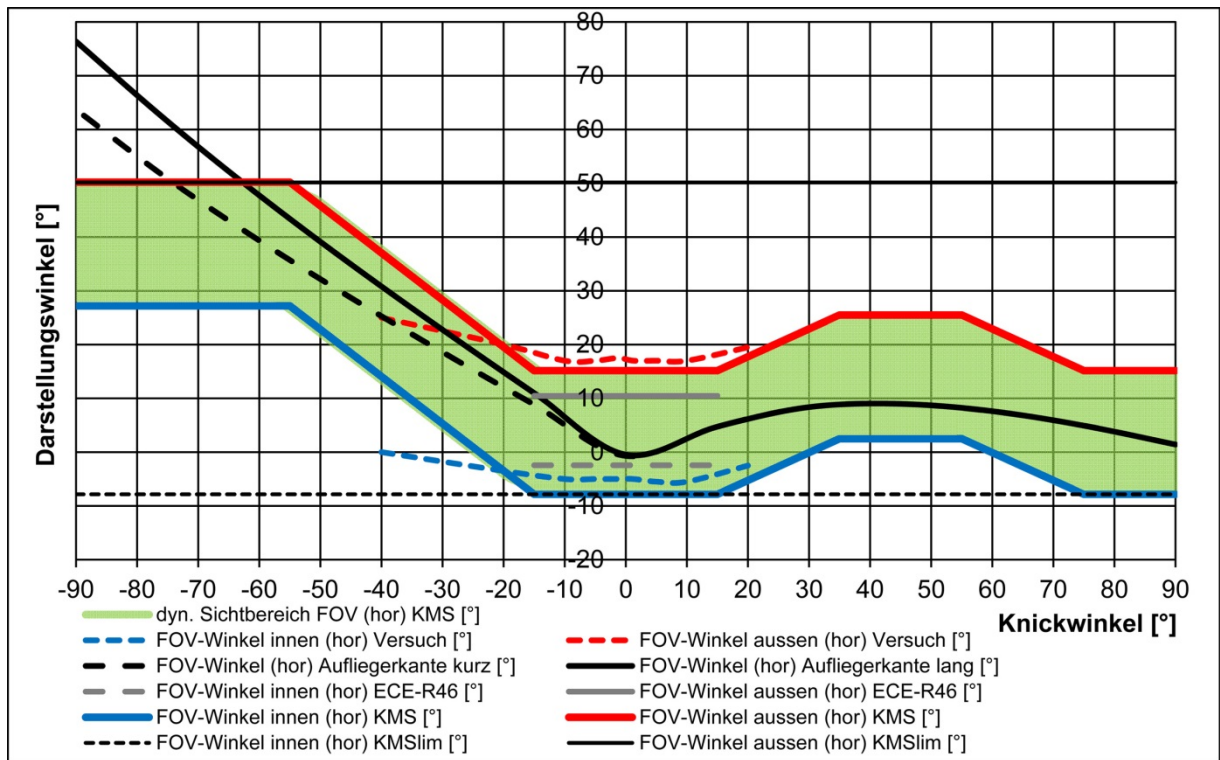


Abbildung A-38: Horizontale Verschiebekennlinie des KMS Klasse II Beifahrerseite

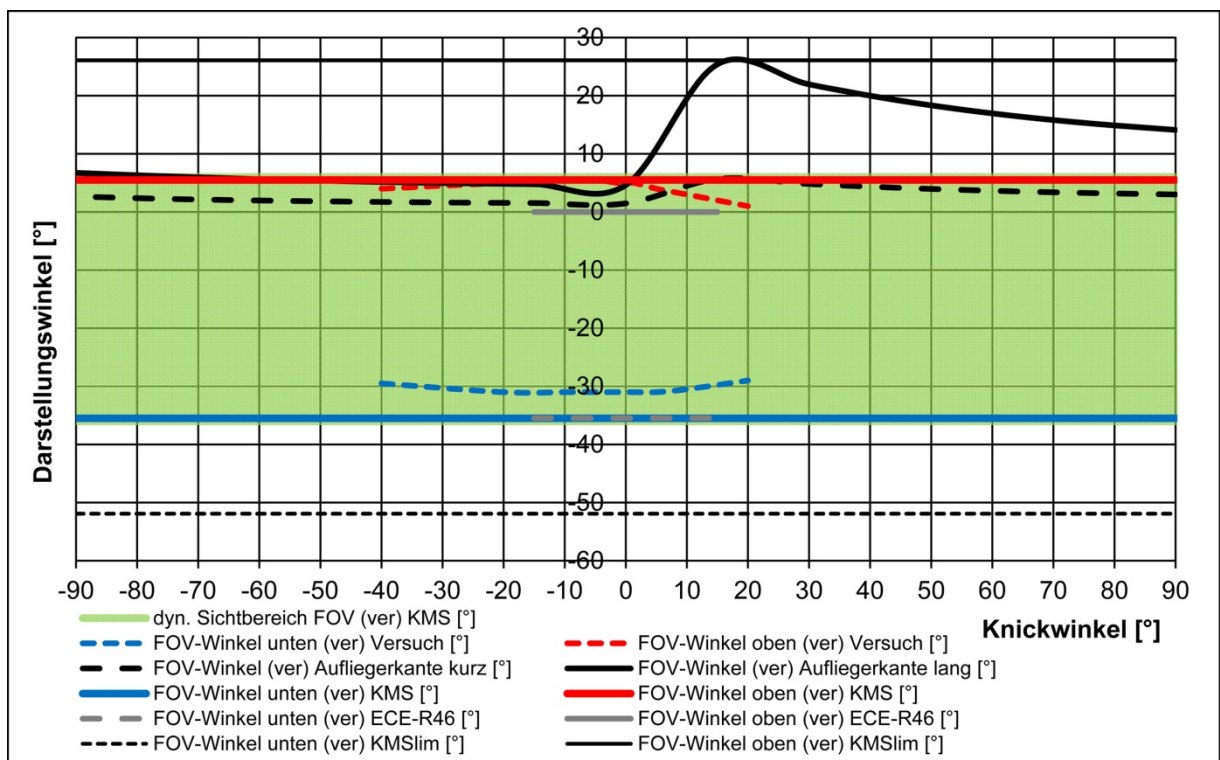


Abbildung A-39: Vertikale Verschiebekennlinie des KMS Klasse II Beifahrerseite

## A12 Zusammenfassung der Ergebnisse

Tabelle A-26: Zusammenfassung der Ergebnisse

<b>H1</b>	Die mittleren dynamischen Augpunktlagen unterscheiden sich von den mittleren statischen Augpunktlagen.	<b>bestätigt</b>
<b>H2</b>	Die Streubreite dynamischer Augpunktlagen ist größer als die Streubreite statischer Augpunktlagen.	<b>bestätigt</b>
<b>H3</b>	Die dynamischen Augpunktlagen kleiner Probanden liegen tiefer als die dynamischen Augpunktlagen großer Probanden.	<b>bestätigt</b>
<b>H4</b>	Die dynamischen Augpunktlagen schlanker Probanden liegen in Fahrzeugfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen korpulenter Probanden.	<b>nicht bestätigt</b>
<b>H5</b>	Die dynamischen Augpunktlagenverteilungen verschiedener Fahrzeugvarianten unterscheiden sich.	<b>bestätigt</b>
<b>H6</b>	Bei komplexen Sichtsituationen wird häufiger als bei Baseline-Sichtsituationen in die Spiegel geblickt.	<b>bestätigt</b>
<b>H7</b>	Die dynamischen Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen liegen in Fahrzeugfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen bei Baseline-Sichtsituationen.	<b>bestätigt</b>
<b>H8</b>	Die dynamischen Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen während der Stadt- oder Überlandfahrt liegen in Fahrzeugfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen während der Autobahnfahrt	<b>bestätigt</b>
<b>H9</b>	Die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen ist größer als die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei Baseline-Sichtsituationen.	<b>bestätigt</b>
<b>H10</b>	Die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen während der Stadt- oder Überlandfahrt ist größer als die Streubreite dynamischer Augpunktlagen bei komplexen Sichtsituationen während der Autobahnfahrt.	<b>bestätigt</b>
<b>H11</b>	Sichtsituationen lassen sich anhand der maximal auftretenden Knickwinkel differenzieren.	<b>bestätigt</b>
<b>H12</b>	Sichtsituationen lassen sich anhand ihrer Geschwindigkeitsverteilung differenzieren.	<b>bestätigt</b>
<b>H13</b>	Bei der Nutzung von Fernverkehrsfahrzeugen im realen Straßenverkehr kann ein Zusammenhang zwischen den maximal auftretenden Knickwinkeln und der Geschwindigkeit festgestellt werden.	<b>bestätigt</b>
<b>H14</b>	Die dynamischen Augpunktlagen bei niedrigen Geschwindigkeiten liegen in Fahrzeugfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen bei hohen Geschwindigkeiten.	<b>bestätigt</b>
<b>H15</b>	Die dynamischen Augpunktlagen bei großen Knickwinkeln liegen in Fahrzeugfahrtrichtung weiter vorne als die dynamischen Augpunktlagen bei kleinen Knickwinkeln.	<b>bestätigt</b>
<b>H16</b>	Die dynamischen Sichtbereiche der indirekten Sicht verschiedener Sichtsituationen unterscheiden sich durch die Breite des genutzten Knickwinkelbereiches.	<b>bestätigt</b>
<b>H17</b>	Der Verlauf dynamischer Sichtbereiche der indirekten Sicht verschiedener Sichtsituationen unterscheidet sich.	<b>bestätigt</b>
<b>H18</b>	Der Verlauf dynamischer Sichtbereiche der indirekten Sicht verschiedener Fahrzeugvarianten unterscheidet sich.	<b>nicht bestätigt</b>
<b>H19</b>	Der Verlauf dynamischer Sichtbereiche der indirekten Sicht verschiedener Körperhöhengruppen unterscheidet sich.	<b>nicht bestätigt</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Schwere Nutzfahrzeuge im Güterfernverkehr (Daimler 2014)	1
Abbildung 1-2:	Referenz-Sattelzugkombination in abgeknicktem Zustand (Daimler 2014)	2
Abbildung 1-3:	Vergleich der direkten Sicht aus einer Mittelklasselimousine und dem Referenz-Sattelzug (e. D. aus Daimler 2014)	3
Abbildung 1-4:	Globale CO <sub>2</sub> -Gesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge (Ernst et. al. 2013 S. 393)	4
Abbildung 1-5:	Energieverbrauch zur Überwindung der Fahrwiderstände eines 40 t Sattelzuges (e. D. nach Kopp & Frank 2013 S. 654)	5
Abbildung 1-6:	Einsparung des Kunden durch CO <sub>2</sub> -Reduktionsmaßnahmen am 40 t Sattelzug	5
Abbildung 1-7:	Komponenten eines Kamera-Monitor-Systems (KMS) für Nutzfahrzeuge (Bothe & Wohlfarth 2014 S. 5)	6
Abbildung 1-8:	Verdeckung der direkten Sicht durch die fahrerseitigen Haupt- und Weitwinkelspiegel eines Fernverkehrsfahrzeugs (e. D. aus Daimler 2014)	6
Abbildung 1-9:	Automationsgrade in der Mensch-Maschine-Interaktion (Hakuli et al. 2012 S. 645)	7
Abbildung 1-10:	Dynamische, vom Fahrer genutzte, Sichtbereiche (schraffierte Flächen) am Beispiel der Kreisverkehrsdurchfahrt (Bothe et al. 2013b S. 298 ff.)	8
Abbildung 1-11:	Simulation der fahrerinitiierten dynamischen Anpassung der Sichtbereiche in konventionellen Spiegelsystemen nach (Bothe et al. 2012a S. 1638)	9
Abbildung 1-12:	Struktur der Arbeit	10
Abbildung 1-13:	Unterschiede in der gesetzliche Längen- und Gewichtsbeschränkungen zwischen der EU und den USA (Ziegler 2008 S. 205)	11
Abbildung 1-14:	Kamera-Monitor-System zum Ersatz des Frontspiegels und zur Darstellung der Rückfahrkamera (Assistenzfunktion) für Sattel- oder Gliederzüge (MEKRA 2013 S. 8)	12
Abbildung 1-15:	Einfluss der Geschlechtsverteilung von Pkw- und Lkw-Fahrern auf die Gesamtkörperhöhenverteilung (Bothe et al. 2013a S. 442)	12
Abbildung 2-1:	Informationsübertragung in Mensch-Maschine-Systemen (Schlick et al. 2010 S. 971)	13
Abbildung 2-2:	Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt z. Erfüllung d. primären Fahraufgabe (e. D. nach Remlinger 2013 S. 47; Donges 1977; Bubb 1985 S. 265; Schweigert 2002 S. 5)	14
Abbildung 2-3:	Aufbau des menschlichen Auges (e. D. nach Schlick et al. 2010 S. 317; Hudelmaier 2002 S. 20; Schober 1950 S. 23)	14
Abbildung 2-4:	Verteilung von Stäbchen und Zapfen über die Netzhaut (Becker-Carus 2004 S. 104)	15
Abbildung 2-5:	Gesichtsfeld für unbunte Reize (nach Schober 1950 S. 96)	15
Abbildung 2-6:	Abhängigkeit der Sehschärfe, der Farbwahrnehmung und der Wahrnehmung von Signalen mit unterschiedlicher Leuchtdichte von der Position innerhalb des Gesichtsfeldes (e. D. nach Schober 1950 S. 97 ff.; Schober 1954 143 ff.; Krueger 1989 S. 10)	16
Abbildung 2-7:	Fixation auf (a) nahe, (b) mittlere und (c) weit entfernte Sichtziele (n. Engelkamp & Zimmer 2006)	16
Abbildung 2-8:	Zusammenspiel von direkter und indirekter Sicht im Nutzfahrzeug; Sichtbereiche auf Fahrbahnniveau (ISO/FDIS 16505 2014 S. 93)	17
Abbildung 2-9:	Spiegelanordnung an einer Sattelzugmaschine (e. D. n. Daimler 2014)	18
Abbildung 2-10:	Sichtverdeckungen der direkten Sicht durch Karosserie- oder Anbauteile an einer Sattelzugmaschine (e. D. nach Danielsson 2011 S. 42)	18
Abbildung 2-11:	Sichtverdeckung während Kreisverkehrsdurchfahrt (links) und in Kreuzungssituation (rechts) (nach ISO/FDIS 16505 2014 S. 126; S. 132)	19
Abbildung 2-12:	Relative Gewichtung unterschiedlicher Sichtzonen der direkten Sicht in Volvo FM/FH-Trucks (Danielsson 2011 S. 59)	19
Abbildung 2-13:	Systemkomponenten eines Kamera-Monitor-Systems (e. D. nach ISO/FDIS 16505 2014 S. 21 f.)	20

Abbildung 2-14:	Meilensteine des ergonomischen Absicherungsprozess (Bothe 2010b S. 30)	21
Abbildung 2-15:	Ebenenstruktur des Ergonomiepasses (Bothe 2010b S. 32)	22
Abbildung 2-16:	Umsetzung des Ergonomiepasses als mehrdimensionale Prüfliste (Bothe 2010b S. 33)	22
Abbildung 2-17:	Auswahl der Prüfkriterien zur Bewertung der direkten und indirekten Sicht (nach Bothe 2010b S. 37)	23
Abbildung 2-18:	Überprüfung der beifahrerseitigen Spiegelsicht aus den Augpunktlagen einer kleinen Frau (links) und eines großen Mannes (rechts) (nach Bothe 2010b S. 94)	23
Abbildung 2-19:	Referenz-Sattelzug zur Bewertung der Anbindungspositionen des Kamera-Monitor-Systems (KMS) (e. D. aus Daimler AG 2014)	25
Abbildung 2-20:	Festgelegte Position der Kameras des KMS (Bothe & Wohlfarth 2014 S. 5)	25
Abbildung 2-21:	Festgelegte Position der Monitore des KMS (e. D. nach Bothe & Wohlfarth 2014 S. 5)	26
Abbildung 2-22:	Polar-Koordinatensystem des Monitors (ISO/FDIS 16505 2014 S. 22)	27
Abbildung 2-23:	Messung der sichtwinkelabhängigen Darstellungsqualität des Monitors (e. D. nach ISO/FDIS 16505 2014 S. 69)	28
Abbildung 2-24:	Vorschlag der Erweiterung des dargestellten Sichtbereichs für „Spezielle Fahrsituationen“ (Fornell-Fagerström & Gardlund 2012 Appendix D)	28
Abbildung 2-25:	Ableitung der Auslegungsparameter des dargestellten Sichtbereichs eines KMS	29
Abbildung 2-26:	Steuerungssystematik zur automatisierten Anpassung des dargestellten Sichtbereiches (Bothe et al. 2013e S. 9)	29
Abbildung 2-27:	Simulation der situationsabhängigen Verschiebung des dargestellten Sichtbereichs (e. D. nach Fornell-Fagerström & Gardlund 2012 S. 53)	30
Abbildung 2-28:	Untersuchungsschritte zur Erstellung der SAE J941 Augellipsoide (e. D. nach SAE J941 2010 S. 6 & 29)	31
Abbildung 2-29:	FARO-Messarm zur Messung von statischen kopffesten Körperpunkten, wie der Augpunktlage, im Fahrzeug (Reed et al. 2000b S. 5 & 8)	31
Abbildung 2-30:	Positionierung der SAE J941 Augellipsoide von 1965/1987 (blau) und 2002 (grün) im Pkw- bzw. Lkw-Maßkonzept (e. D. aus SAE J941 1997 S. 10; SAE J941 2010 S. 12)	32
Abbildung 2-31:	Anordnung der Kameras zur Erfassung der Sitzhaltung im Prüfstand VEMO (vgl. Rigel 2005 S. 35; Fröhmel 2010 S. 49)	32
Abbildung 2-32:	Augpunktlagenverteilung im BMW Z4 MJ 2002 Roadster (Fröhmel 2010 S. 82)	33
Abbildung 2-33:	Augpunktlagenverteilung im BMW Z4 MJ 2002 Limousine (Fröhmel 2010 S. 83)	33
Abbildung 2-34:	Durch realen Augpunktlagenverteilungen validierte RAMSIS-Testkollektive innerhalb einer Limousine (MB C-Klasse MJ 2009) und eines Kompaktvans (MB B-Klasse MJ 2009) (Bothe 2010a S. 80 f.)	34
Abbildung 2-35:	Untersuchungsschritte zur Ableitung von RAMSIS-Simulationen mit auf Sichtziel ausgerichteter Augpunktlage (oGAUM) (Hudelmaier 2002 S. 51 & 95)	34
Abbildung 2-36:	Ermittlung von statischen Augpunktlagenverteilungen (Woyna 2013 S. 63 ff.)	35
Abbildung 2-37:	Relative Gesamt-Blickdichteverteilung (Woyna 2013 S. 159)	35
Abbildung 2-38:	Gewichtete Sichtbewertungszonen (Woyna 2013 S. 73)	36
Abbildung 2-39:	Glaskuppelfahrzeug und Messtechnik zur Bestimmung dynamischer Augpunktlagen und Sichtstrahlorientierungen (Scholly 2002 S. 10 ff.)	36
Abbildung 2-40:	Von Sichteinschränkungen abhängige mittlere Augpunktlagen verschiedener Verkehrs-Situationen (Scholly 2002 S. 26 f.)	37
Abbildung 2-41:	Fahrzeugfestes Stereokamerasystem zur kontaktlosen Messung von Augpunktlagen und Sichtstrahlorientierungen (FaceLAB5 2009b S. 1 f.)	37
Abbildung 2-42:	Bestimmung von statischen Sichtbereichen der indirekten Sicht durch Aufstellen von Pylonen (Dodd 2009 S. 31)	38
Abbildung 2-43:	Messung und Berechnung von statischen Sichtbereichen der indirekten Sicht (Lehto Way & Reed 2003 S. 2 & 5)	38

Abbildung 2-44:	Simulation von statischen Sichtbereichen der indirekten Sicht mittels Sichtkegeln (links) und Schnittkonturen mit xy-Ebenen (rechts) (Cook et al. 2011 S. 38 ff.)	39
Abbildung 2-45:	Visualisierung der im Spiegel dargestellten Sichtbereiche mittels RAMSIS-Simulation und Rendering aus orientierter Augpunktlage (Bothe et al. 2012a S. 1637 f.)	39
Abbildung 2-46:	Arbeitsschritte zur Erstellung von sichtszielabhängigen Bewegungssimulationen und resultierender Bewegungsraum (e. D. aus Zaindl et al. 2013 S. 3 ff.)	40
Abbildung 2-47:	Markerbasierte Aufzeichnung von Realdaten zur Rekonstruktion der Haltung beim Blick in den HSR (e. D. aus Zaindl et al. 2013 S. 5 & Zaindl et al. 2014 S. 2)	40
Abbildung 2-48:	Vergleich der simulierten und von Realversuchen rekonstruierten Haltungen beim Blick in den HSL (Zaindl et al. 2014 S. 3)	41
Abbildung 3-1:	Lkw-Fahrer-Probandenkollektiv zur Untersuchung des Einflusses der Körperhöhe (Bothe et al. 2012a S. 1641)	47
Abbildung 3-2:	Körperhöhenverteilungen deutscher Populationen (e. D. n. Jürgens 1999 B-1.2; Jürgens et al. 2000 S. 30)	47
Abbildung 3-3:	Stammlängenverteilungen deutscher Populationen (e. D. n. Jürgens 1999 B-1.2; Jürgens et al. 2000 S. 31)	48
Abbildung 3-4:	Taillenumfangsverteilungen deutscher Populationen (e. D. n. Jürgens 1999 B-1.2; Jürgens et al. 2000 S. 31)	48
Abbildung 3-5:	Fahrerhausvarianten für den Einsatz im schweren Güterfernverkehr (e. D. nach Daimler 2011a S. 3)	49
Abbildung 3-6:	Breites und hoch aufgesetztes Fahrerhaus (links) schmales und niedrig aufgesetztes Fahrerhaus (rechts) (e. D. nach Daimler 2011a S. 56 f.)	49
Abbildung 3-7:	Versuchsfahrzeug V1: Gliederzugkombination mit breitem und hoch aufgesetztem Fahrerhaus (e. D. nach Daimler 2011a S. 56; Isella 2012 S. 50)	50
Abbildung 3-8:	Versuchsfahrzeug V2: Sattelzugkombination mit breitem und hoch aufgesetztem Fahrerhaus (e. D. nach Daimler 2011a S. 56; Isella 2012 S. 50)	50
Abbildung 3-9:	Versuchsfahrzeug V3: Sattelzugkombination mit schmalem und niedrig aufgesetztem Fahrerhaus (e. D. nach Daimler 2011a S. 57; Isella 2012 S. 51)	50
Abbildung 3-10:	Stadt- und Rangier-Sichtssituationen (e. D. n. Isella 2012 S. 59 f.)	52
Abbildung 3-11:	Landstraßen-Sichtssituationen (e. D. n. Isella 2012 S. 60 ff.)	53
Abbildung 3-12:	Autobahn-Sichtssituationen (e. D. n. Isella 2012 S. 62 ff.)	53
Abbildung 3-13:	Messpunkte im Kabinen-Koordinatensystem (KKOS) zur Dokumentation der probandenindividuellen Fahrzeugeinstellungen (e. D. mit Daimler 2014)	55
Abbildung 3-14:	Messpunkte der dynamischen Augpunktlagen und Vektoren der dynamischen Sichtstrahlorientierungen dargestellt im Kabinen-Koordinatensystem	56
Abbildung 3-15:	Ausschnitt des versuchsbegleitenden Fragebogens zur Erhebung der subjektiven Bewertung des konventionellen Gesamtsichtsystems	58
Abbildung 3-16:	4-faktorielles Versuchsdesign	59
Abbildung 3-17:	Ableitung der erforderlichen Stichprobengröße (N)	59
Abbildung 3-18:	Ablaufplan Probandenversuch Teil 1 im Labor	61
Abbildung 3-19:	Ablaufplan Probandenversuch Teil 2 im Fahrzeug	62
Abbildung 3-20:	Versuchsstrecke Teil 1 mit Rangier-, Stadt- und Landstraßenanteilen (e. D. aus Google Maps 2014)	63
Abbildung 3-21:	Versuchsstrecke Teil 2 Autobahnabschnitt (e. D. aus Google Maps 2014)	64
Abbildung 3-22:	Lebensalter- und Lkw-Fahrfahrungsverteilungen der Stichprobe N = 152	66
Abbildung 3-23:	Lkw-Fahrleistungsverteilungen und -zusammensetzung der Stichprobe N = 152	66
Abbildung 3-24:	Klassifizierung der Stichprobe N = 152 nach den Körperhöhen	67
Abbildung 3-25:	Körperhöhenverteilung der Stichprobe N = 152 (vgl. Jürgens 1999 B-1.2; Jürgens et al. 2000 S. 30)	67



Abbildung 3-26:	Klassifizierung der Stichprobe N = 152 nach den Stammlänge	68
Abbildung 3-27:	Stammlängenverteilung der Stichprobe N = 152 (vgl. Jürgens 1999 B-1.2; Jürgens et al. 2000 S. 30)	68
Abbildung 3-28:	Klassifizierung der Stichprobe N = 152 nach dem Taillenumfang	69
Abbildung 3-29:	Taillenumfangsverteilung der Stichprobe N = 152 (vgl. Jürgens 1999 B-1.2; Jürgens et al. 2000 S. 30)	69
Abbildung 3-30:	Spezifikation der Varianten des Platinum FaroArms (FARO 2007 S. 1 f.)	70
Abbildung 3-31:	Systemkomponenten eines faceLAB5 Systems (vgl. FaceLAB5 2009a S. 5 ff.)	70
Abbildung 3-32:	Referenzpunkte des Gesichts und Spezifikationskennwerte des Messsystems faceLAB5 (FaceLAB5 2009a S. 25 & FaceLAB5 2009b S. 2)	71
Abbildung 3-33:	Gesamtsystem bestehend aus drei Einzelsystemen (FaceLAB5 2008 S. 12 f.)	71
Abbildung 3-34:	Ausgewählter Datenlogger GL3100 der Firma Vector zur Aufzeichnung der Sicht- und Fahrzeugdaten im Fahrzeug (Vector 2013 S. 4 & 14)	72
Abbildung 3-35:	konzeptionelle Anordnung der Messtechnikkomponenten im Versuchsfahrzeug	72
Abbildung 3-36:	Integration des faceLAB5-Systeme (links) und des FaroArms (rechts) im Fahrerhaus der Versuchsfahrzeuge (Bothe et al. 2012a S. 1644 f.)	73
Abbildung 3-37:	Einsatz des FaroArms zur Bestimmung statischer Körper- und Fahrzeugpunkte	73
Abbildung 3-38:	Integration der faceLAB5-Systeme im Versuchsfahrzeug	74
Abbildung 3-39:	Architektur der Datenaufzeichnung im Fahrzeug (Bothe et al. 2012a S. 1644)	74
Abbildung 3-40:	Auswahl und Ausrichtung der Objektive auf die probandenindividuelle Augpunktlage (vgl. FaceLAB5 2009a S. 59 ff.)	75
Abbildung 3-41:	Festlegung der probandenindividuellen Referenzpunkte und Überprüfung der Qualität des Head-Tracking (vgl. FaceLAB5 2009a S. 54 ff.)	76
Abbildung 3-42:	Auswahl der Methode und Einstellung der Parameter des Gaze-Tracking (vgl. FaceLAB5 2009a S. 59 ff.)	76
Abbildung 3-43:	Situationsabhängige Datenaufzeichnung am Beispiel der Kreisverkehrsdurchfahrt (Bothe et al. 2013b S. 298)	77
Abbildung 3-44:	Übersicht der Sichtsituationen und Vorlaufzeiten der Datenaufzeichnung (e. D. n. Isella 2012 S. 65)	77
Abbildung 4-1:	Aufzeichnungsanteil je Sichtsituation (V1-3; S01-11; n = 1.916.041)	78
Abbildung 4-2:	Sichtdatenverfügbarkeit je Sichtsituation und Versuchsfahrzeug	79
Abbildung 4-3:	Auswertungsanteil je Sichtsituation (V1-3; S01-02 & S05-11; n = 1.736.293)	79
Abbildung 4-4:	Definition der Sichtzielflächen (AOI) und Berechnung der Sichtzielpunkte (GIP) (e. D. nach Gatti 2013 S. 52)	80
Abbildung 4-5:	Funktionsprinzip des Knickwinkelschätzers (Bothe et al. 2013e S. 9)	81
Abbildung 4-6:	Exemplarischer Knickwinkelverlauf für eine Kreisverkehrsdurchfahrt (S06)	81
Abbildung 4-7:	Funktionsprinzip der ergonomischen Sichtdatenbank (Bothe et al. 2013c S. 16)	83
Abbildung 4-8:	Kabinenfeste Komponenten des CAD-Grundmodells zur Sichtbereichsberechnung (Bothe et al. 2012a S. 1650)	83
Abbildung 4-9:	Simulationsumgebung des CAD-Grundmodells zur Sichtbereichsberechnung (Bothe et al. 2012a S. 1650)	84
Abbildung 4-10:	Makrobasierte Anwendung des CAD-Modells zur Ableitung der dyn. Sichtbereiche	84
Abbildung 4-11:	Ermittlung der probandenindividuellen Mittelwerte der statischen und dynamischen Augpunktlagenverteilungen (V2; VP58; n = 10.705) Seitenansicht	85
Abbildung 4-12:	Ermittlung der probandenindividuellen Mittelwerte der statischen und dynamischen Augpunktlagenverteilungen (V2; VP58; n = 10.705) Draufsicht	86
Abbildung 4-13:	Vergleich Mittelwerte stat./dyn. Augpunktlagen (V1-V3; N = 152) Seitenansicht	87

Abbildung 4-14:	Vergleich Mittelwerte stat./dyn. Augpunktlagen (V1-V3; N = 152) Draufsicht	88
Abbildung 4-15:	Ermittlung der probandenindividuellen statischen und dynamischen Offsetwerte zum MW GAUM gesamt zur Beschreibung der Streubreite	89
Abbildung 4-16:	Streubreite statischer und dynamischer Augpunktlagen V1-V3 N = 152	89
Abbildung 4-17:	Einfluss der Körperhöhe auf dyn. Augpunktlagen V1-V3 N = 152 Seitenansicht	91
Abbildung 4-18:	Einfluss des Taillenumfangs auf dyn. Augpunktlagen V1-V3 N = 152 Seitenansicht	93
Abbildung 4-19:	Einfluss der Fahrzeugvariante auf dyn. Augpunktlagen V1-V3 N = 152 Seitenansicht	94
Abbildung 4-20:	Einfluss der Fahrzeugvariante auf dyn. Augpunktlagen V1-V3 N = 152 Draufsicht	94
Abbildung 4-21:	Normierte Häufigkeit der Spiegelblicke V2 n = 46	96
Abbildung 4-22:	Vergleich dyn. GAUM S05 (V2; n = 35.659) und S06 (V2; n = 20.588) Seitenansicht	97
Abbildung 4-23:	Vergleich dyn. GAUM S05 (V2; n = 35.659) und S06 (V2; n = 20.588) Draufsicht	97
Abbildung 4-24:	Einfluss der Sichtsituation S05-S08 auf die dyn. Augpunktlage V2 n = 46 Seitenansicht	98
Abbildung 4-25:	Einfluss der Sichtsituation S02, S06 und S10 auf die dyn. Augpunktlage n = 46 Seitenansicht	V2 99
Abbildung 4-26:	Ermittlung der probandenindividuellen dynamischen Offsetwerte zum MW GAUM Proband zur Beschreibung der Streubreite	100
Abbildung 4-27:	Streubreite der dynamische Augpunktlagen je Sichtsituation S05-08 V2 n = 46	101
Abbildung 4-28:	Streubreite der dynamische Augpunktlagen S10, S02 & S06 V2 n = 46	103
Abbildung 4-29:	Knickwinkelverteilung V2 S05 (n = 46.933) und S06 (n = 40.312)	105
Abbildung 4-30:	Zusammenhang zwischen Sichtsituation und Knickwinkel V2 n = 46	106
Abbildung 4-31:	Differenzierung der Sichtsituationen durch die maximal auftretenden Knickwinkel (Intervall > P90) V2 n = 46	106
Abbildung 4-32:	Geschwindigkeitsverteilung V2 S05 (n = 46.933) und S06 (n = 40.312)	108
Abbildung 4-33:	Zusammenhang zwischen Sichtsituation und Geschwindigkeit V2 N = 46	108
Abbildung 4-34:	Knickwinkel über Geschwindigkeit V2 n = 624.120	109
Abbildung 4-35:	Medianwerte der Grenzperzentile (> P90) des Knickwinkels V2 n = 62.411	110
Abbildung 4-36:	Einfluss der Geschwindigkeit auf dyn. Augpunktlagen V2 n = 46 Seitenansicht	111
Abbildung 4-37:	Einfluss der Geschwindigkeit auf dyn. Augpunktlagen V2 n = 46 Draufsicht	112
Abbildung 4-38:	Einfluss des Knickwinkels auf dyn. Augpunktlagen V2 n = 46 Seitenansicht	113
Abbildung 4-39:	Einfluss des Knickwinkels auf dyn. Augpunktlagen V2 n = 46 Draufsicht	114
Abbildung 4-40:	Bewertung der verfügbaren Sichtbereiche nach der Autobahnfahrt (links) und nach Versuchsabschluss (rechts) N = 152	115
Abbildung 4-41:	Subjektive Bewertung der Sichtbereiche innerhalb der Fahraufgabe N = 152	115
Abbildung 4-42:	Definition der horizontalen Sichtbereichswinkel (FOV-Winkel) zur Darstellung des dynamischen Sichtbereichs	116
Abbildung 4-43:	Genutzte Knickwinkelbereiche der Landstraßen-Sichtsituationen V2 HSL	117
Abbildung 4-44:	Genutzte horizontaler dyn. Sichtbereiche der Landstraßen-Sichtsituationen V2 HSL	117
Abbildung 4-45:	Definition der vertikalen Sichtbereichswinkel (FOV-Winkel) zur Darstellung des dynamischen Sichtbereichs	118
Abbildung 4-46:	Genutzte vertikale dyn. Sichtbereiche der Landstraßen-Sichtsituationen V2 HSL	118
Abbildung 4-47:	Genutzte hor. dyn. Sichtbereiche aller Sichtsituationen V2 HSL (links)	119
Abbildung 4-48:	Genutzte ver. dyn. Sichtbereiche aller Sichtsituationen V2 HSL (links)	119
Abbildung 4-49:	Genutzte horizontale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen HSL V2-V3	120
Abbildung 4-50:	Genutzte vertikale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen HSL V2-V3	120

Abbildung 4-51:	Genutzte horizontale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen V2 HSL KHG	121
Abbildung 4-52:	Genutzte vertikale dynamische Sichtbereiche aller Sichtsituationen V2 HSL KHG	121
Abbildung 4-53:	Augellipsoid zur Beschreibung der dyn. Augpunktlagen V2 n = 46 Seitenansicht	122
Abbildung 4-54:	Ausrichtung der Displayoberfläche auf den MW der dynamischen Augpunktlagen und Absicherung der Öffnungswinkel anhand des Augellipsoiden	123
Abbildung 4-55:	Horizontale Verschiebekennlinien des KMS Klasse II Fahrerseite	124
Abbildung 4-56:	Horizontale Verschiebekennlinien des KMS Klasse II Beifahrerseite	124
Abbildung 4-57:	Vertikale Verschiebekennlinien des KMS Klasse II Fahrerseite	125
Abbildung 5-1:	Schritte der Datenaufzeichnung und -konvertierung	131
Abbildung 5-2:	Schritte zur systematischen Durchführung der Methode (Bothe et al. 2013c S. 15)	132
Abbildung 5-3:	Anwendungsorientierte Datenauswahl und ergonomische Datenanalyse (Bothe et al. 2013c S. 16)	132
Abbildung 5-4:	Prozessschrittabhängige Anwendung der Analyse (Bothe et al. 2013c S. 18)	133
Abbildung 5-5:	Einbindung der Analyse in die ergo. Bewertungssystematik (Bothe et al. 2013c S. 19)	133
Abbildung 6-1:	Statische und dynamische Augpunktlagenverteilung (V1-V3; N = 152) Seitenansicht	134
Abbildung 6-2:	Statische und dynamische Augpunktlagenverteilung (V1-V3; N = 152) Draufsicht	134
Abbildung 6-3:	Funktionsprinzip der ergonomischen Sichtdatenbank (Bothe et al. 2013c S. 16)	135
Abbildung 6-4:	Analyse dynamischer Sichtsituationen (Bothe et al. 2013c S. 15)	135
Abbildung 6-5:	Geschwindigkeitsabhängige Knickwinkelverteilung V2 n = 624.120	136
Abbildung 6-6:	Knickwinkelabhängigkeit der dynamischen Augpunktlagen V2 n = 46 Seitenansicht	136
Abbildung 6-7:	Horizontale Verschiebekennlinien des KMS Klasse II Fahrerseite	137
Abbildung 6-8:	Einbindung der Analyse dynamischer Sichtsituationen in den Fahrzeugentwicklungsprozess (Bothe et al. 2013c S. 18)	137
Abbildung 6-9:	Korrektur der statischen Augpunktlagen durch Offsetverschiebung	138
Abbildung 6-10:	Modell zur Visualisierung und Bewertung der verfügbaren Sichtbereiche auf der Anzeigefläche eines Nutzfahrzeugs (Isella 2012 S. 94)	139

---

## **Tabellenverzeichnis**

---

Tabelle 2-1:	Ableitung der technologiebedingten Auslegungsparameter eines KMS	24
Tabelle 2-2:	Anforderungen an die Kameraposition und -ausrichtung eines KMS	25
Tabelle 2-3:	Anforderungen an die Monitorposition und -ausrichtung eines KMS	26
Tabelle 2-4:	Anforderungen an das KMS-Gesamtsystem	27
Tabelle 3-1:	Kritische Anwendungsfälle (UC) v. KMS (n. ISO/FDIS 16505 2014 S. 40 ff. & 125 ff.)	51
Tabelle 3-2:	Demographische Daten zur Beschreibung der Stichprobe	54
Tabelle 3-3:	Statische Körperpunkte der idealen Fahrhaltung im KKOS vgl. Jürgens 1989a S. 1 ff.	54
Tabelle 3-4:	Dynamische fahrerbezogene Messwerte der Sichtinteraktion	56
Tabelle 3-5:	Dynamische fahrzeugbezogene Messwerte der Sichtinteraktion	57
Tabelle 3-6:	Faktorstufen, die den fahrzeugbezogenen Messwerten zugeordnet werden	57
Tabelle 3-7:	Vergleich der Vor- und Nachteile unterschiedlicher Versuchsumgebungen (nach Breuer 2012 S. 57 ff.)	60
Tabelle 3-8:	Angaben zum Versuchsablauf und -umfang	65
Tabelle 3-9:	Anforderungen an die Stichprobenzusammensetzung	65
Tabelle 4-1:	Elemente eines Datensatzes der ergonomischen Sichtdatenbank	82
Tabelle 4-2:	Ergebnisse der t-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H1)	87
Tabelle 4-3:	Ergebnisse des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H1)	88
Tabelle 4-4:	Ergebnisse der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H2)	90
Tabelle 4-5:	Ergebnisse des t-Tests für unabhängige Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H3)	91
Tabelle 4-6:	Ergebnisse der t-Tests für unabhängige Stichproben zur explorativen Untersuchung des Einflusses der Körperhöhe auf die Augpunktlagenhöhe	92
Tabelle 4-7:	Ergebnisse der GT2-Tests nach Hochberg zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H5)	95
Tabelle 4-8:	Ergebnisse der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H6)	96
Tabelle 4-9:	Ergebnisse der t-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H7)	98
Tabelle 4-10:	Ergebnisse der t-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H8)	99
Tabelle 4-11:	Ergebnisse der t-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H9)	101
Tabelle 4-12:	Ergebnisse der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H9)	102
Tabelle 4-13:	Ergebnisse der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H10)	103
Tabelle 4-14:	Ergebnisse der t-Tests für verbundene Stichproben zur Überprüfung der gerichteten Unterschiedshypothese (H10)	104
Tabelle 4-15:	Ergebnisse der Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H11)	107
Tabelle 4-16:	Ergebnisse der Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H12)	109

---

Tabelle 4-17:	Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H14)	111
Tabelle 4-18:	Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige zur Abhängigkeit der y-Position der dynamischen Augpunktlage von der Fahrzeuggeschwindigkeit	112
Tabelle 4-19:	Ergebnisse der Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige Stichproben zur Überprüfung der Unterschiedshypothese (H15)	113
Tabelle 4-20:	Ergebnisse der Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige zur Abhängigkeit der y-Position der dynamischen Augpunktlage von der Fahrzeuggeschwindigkeit	114
Tabelle 5-1:	Ergebnisse der Analyse statischer und dynamischer Augpunktlagenverteilungen	126
Tabelle 5-2:	Ergebnisse zur Identifikation des Knickwinkels als Prädiktor dynamischen Sichtverhaltens	128
Tabelle 5-3:	Ergebnisse der Analyse dynamischer Sichtbereiche der indirekten Sicht	129



---

## Literaturverzeichnis

---

- Abendroth & Bruder 2012      Abendroth, Bettina; Bruder Ralph (2012): Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung. In: Winner, Hermann et al. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg +Teubner Verlag, Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- BAG 2011      Bundesamt für Güterverkehr (2011): Mautstatistik – Jahrestabellen 2010. Bundesamt für Güterverkehr, Köln.
- BAG 2012      Bundesamt für Güterverkehr (2012): Mautstatistik – Jahrestabellen 2011. Bundesamt für Güterverkehr, Köln.
- Becker-Carus 2004      Becker-Carus, Christian (2004): Allgemeine Psychologie. Eine Einführung. Elsevier, München.
- Bernotat 1970      Bernotat, Rainer (1970): Anthropotechnik in der Fahrzeugführung, Ergonomics, Vol. 13, No. 3, S. 353-377, London.
- Blomdahl 2012      Blomdahl, Patrik (2012): Mirror usage in trucks. In: Fornell-Fagerström, Katarina; Gardlund, Alexander (2012): Mirror replacement in trucks. Master Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- Blower 2007      Blower, Daniel (2007): Truck Mirrors, Fields of View, and Serious Truck Crashes. University of Michigan, Transportation Research Institute, Ann Arbor, Michigan, USA.
- Bortz et al. 1990      Bortz, Jürgen et al. (1990): Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik. Springer, Berlin.
- Bothe 2010a      Bothe, Alexander (2010): Einfluss unterschiedlicher Sitzhaltungen auf den binauralen Höreindruck im Fahrzeuginnenraum. Studienarbeit. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Bothe 2010b      Bothe, Alexander (2010): Entwicklung eines parameterbasierten CAD-Modells zur Ergonomieabsicherung einer Mittelklasselimousine. Diplomarbeit. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Bothe et al. 2012a      Bothe, Alexander; Wohlfarth, Enrico; Bruder, Ralph (2012): Dimensioning of actual fields of indirect vision of commercial vehicles by analyzing dynamic vision situations. In: Tagungsband zum 21. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen/Beijing.
- Bothe et al. 2012b      Bothe, Alexander; Wohlfarth, Enrico; Bruder, Ralph (2012): Analysis of dynamic vision situations as a basic condition for human model based design of commercial vehicles. Human Solutions RAMSIS User Conference 2012, Hamburg.
- Bothe et al. 2012c      Bothe, Alexander; Wohlfarth, Enrico; Bruder, Ralph (2012): Input from the method of analyzing dynamic vision situations into the ISO working group regarding “Ergonomic and performance aspects of Camera-Monitor Systems”. ISO Working Group Conference, Yokohama.
- Bothe et al. 2013a      Bothe, Alexander; Wohlfarth, Enrico; Kirschbaum, Markus; Bruder, Ralph (2013): Selection of relevant test parameters and their influence on first results of the analysis of dynamic vision situations in commercial vehicles, 59. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA), Krefeld.
- Bothe et al. 2013b      Bothe, Alexander; Wohlfarth, Enrico; Kirschbaum, Markus; Bruder, Ralph (2013): Variation of actual fields of indirect vision in commercial vehicles during dynamic vision situations. 13th Stuttgart International Symposium of Automotive and Engine Technology, Stuttgart.
- Bothe et al. 2013c      Bothe, Alexander; Wohlfarth, Enrico; Kirschbaum, Markus; Bruder, Ralph (2013): Method of the analysis of dynamic vision situations as a fundamental component of the vehicle development process and realistic criterion for systematic ergonomic evaluation. Human Solutions RAMSIS User Conference 2013, Kaiserslautern.

- 
- |                        |  |
|------------------------|--|
| Bothe et al. 2013d     | Analysis of dynamic vision situations and exemplary application for ergonomic design of display and vision systems in commercial vehicles. Seminarvortrag am Lehrstuhl für Ergonomie (LfE), Technische Universität München, München.   |
| Bothe et al. 2013e     | Bothe, Alexander; Kober, Werner; Wohlfarth, Enrico (2013): Verfahren zum Steuern eines Kamerasystems für ein Fahrzeug und Kamerasystem. Offenlegungsschrift. Deutsches Patent- und Markenamt, München.   |
| Bothe & Wohlfarth 2014 | Bothe, Alexander; Wohlfarth, Enrico (2014): Nutzfahrzeug mit Bilderfassungseinrichtung. Offenlegungsschrift. Deutsches Patent- und Markenamt, München.   |
| Brähler 2010           | Brähler, Hermann (2010): Konzeption von Nutzfahrzeugen. In: Hoepke, Erich; Breuer, Stefan (Hrsg.) Nutzfahrzeugtechnik. Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien, Wiesbaden.  |
| Braun & Kolb 2008      | Braun, Heribert; Kolb, Günter (2008): LKW Ein Lehrbuch und Nachschlagewerk. Kirschbaum Verlag, Bonn.   |
| Breuer 2012            | Breuer Jörg (2012): Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen. In: Winner, Hermann et al. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg + Teubner Verlag, Springer Fachmedien, Wiesbaden.   |
| Breuer & Kopp 2013     | Breuer, Stefan; Kopp, Stephan (2013): Fahrmechanik. In: Hoepke, Erich; Breuer, Stefan (Hrsg.): Nutzfahrzeugtechnik, Springer Fachmedien, Wiesbaden.  |
| Brückmann et al. 2000  | Brückmann, Ralph; et al. (2000): Blickfixationen und Blickbewegungen des Fahrzeugführers sowie Hauptsichtbereiche an der Windschutzscheibe. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT), Frankfurt am Main.  |
| Brues 1946             | Brues, A.M. (1946): Movement of the Head and Eye in Sighting. In: Randall, F.E., Damon A., Benton, R.S. and Patt D.L.: Human Body Size in Military Aircraft and Personal Equipment. Technical Report No. 5501, U.S. Army Air Forces, Wright Field Dayton, Ohio.              |
| Bubb 1977              | Bubb, Heiner (1977): Analyse der Geschwindigkeitswahrnehmung im Kraftfahrzeug. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 31, Ergonomia Verlag, Stuttgart.   |
| Bubb 1985              | Bubb, Heiner (1985): Arbeitsplatz Fahrer – Eine ergonomische Studie. Automobil-Industrie, Vogel Business Media, Würzburg.  |
| Bubb & Hudelmaier 2001 | Bubb, Heiner; Hudelmaier, Jörg (2001): 1-Liter-Auto und Anthropometrische Gestaltung. In: Fahrzeugkonzepte für das 2. Jahrhundert Automobiltechnik. 19.VDI/VW Gemeinschaftstagung. VDI-Berichte Nr.1653. Düsseldorf.   |
| Bürkle et al. 2011     | Bürkle, Kai; Kamusella, Christiane; Hoske, Petra (2011): Methode zur prozess- und nutzerabhängigen Sichtanalyse bei mobilen Arbeitsmaschinen. In: Tagungsband des 57. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA), Chemnitz.                                     |
| Burandt 1978           | Burandt, Ulrich (1978): Ergonomie für Design und Entwicklung. Verlag Dr. Otto Schmidt, Köln.   |
| Cohen & Zwahlen 1989   | Cohen, Amos; Zwahlen, Helmut (1989): Zur Bedeutung des fovealen Sehens bei der Informationsaufnahme bei hoher Beanspruchung. In Derkum, Harald (Hrsg.): Sicht und Sicherheit im Straßenverkehr, Tagungsband der 3. Konferenz Vision in Vehicles, Verlag TÜV Rheinland, Köln. |
| Cohen 1998             | Cohen, Amos (1998): Visuelle Orientierung im Straßenverkehr. Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung, Bern.   |
| Cohen 1988             | Cohen, Jacob (1988): Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. Academic Press. New York.   |
| Cohen 1990             | Cohen, Jacob (1990): Things I Have Learned (So Far). In: American Psychologist, 45(12), 1304-1312, Washington.   |

Cook et al. 2010	Cook, Sharon et. al. (2010): The Development of Improvements to Drivers' Direct and Indirect Vision from Vehicles – Phase 1. Loughborough Design School, Loughborough.
Cook et al. 2011	Cook, Sharon et. al. (2011): The Development of Improvements to Drivers' Direct and Indirect Vision from Vehicles – Phase 2. Loughborough Design School, Loughborough.
Daimler 2011a	Daimler AG (2011): Der neue Actros. Fernverkehr. 18 – 26 Tonnen. Daimler AG, Stuttgart.
Daimler 2011b	Daimler AG (2011): Der neue Actros. Technisches Portfolio. Daimler AG, Stuttgart.
Daimler 2014	Daimler AG (2014): Global Media Site – Pressemitteilungen und Pressemappen online. Zugriff unter: <a href="http://media.daimler.com/dcmmedia/home/de">http://media.daimler.com/dcmmedia/home/de</a>
Danielsson 2011	Danielsson, H. (2011): Critical vision & Adapted driving postures. In: Fornell-Fagerström, Katarina; Gardlund, Alexander (2012): Mirror replacement in trucks. Master Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg.
Devesa & Indinger 2011	Devesa, Antoine; Indinger, Thomas (2011): Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen. In: FAT-Schriftenreihe Nr. 237. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., Berlin.
DESTATIS 2011	Statistisches Bundesamt (2011): Verkehrsunfälle – Unfälle von Güterkraftfahrzeugen 2010. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
DESTATIS 2012	Statistisches Bundesamt (2012): Verkehrsunfälle – Unfälle von Güterkraftfahrzeugen 2011. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
DESTATIS 2014	Statistisches Bundesamt (2014): Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihen von Januar 2000 bis Februar 2014. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
Devlin 1968	Devlin, William (1968): The Eyellipse and Considerations in the Driver's Forward Field of View. Technical Paper 680105, SAE International, Warrendale.
Dodd 2009	Dodd, Martin (2009): Follow up study to the heavy goods vehicle blind spot modelling and reconstruction trial. Published Project Report. Transportation Research Laboratory, Crowthorne.
Donges 1977	Donges, Edmund (1977): Ein Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Forschungsbericht Nr. 27 des Forschungsinstituts für Anthropotechnik, Meckenheim.
Donges 1982	Donges, Edmund (1982): Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. Automobil-Industrie 27, Vogel Business Media, Würzburg.
Donges 2012	Donges, Edmund (2012): Fahrerhaltensmodelle. In: Winner, Hermann et al. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien, Wiesbaden.
Duchowski 2007	Duchowski, Andrew (2007): Eye Tracking Methodology: Theory and Practice. Springer-Verlag London Limited, London.
Engelkamp & Zimmer 2006	Engelkamp, Johannes; Zimmer, Hubert (2006): Lehrbuch der Kognitiven Psychologie. Hogrefe, Göttingen.
Ernst et al. 2013	Ernst, Christian-Simon; Olschewski, Ingo; Eckstein, Lutz (2013): Implikation der neuen CO <sub>2</sub> -Gesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge im Fernverkehr. In: Göpfert, Ingrid et. al. (Hrsg.), Automobillogistik – Stand und Zukunftstrends, Springer Gabler, Wiesbaden.
FaceLAB5 2008	Seeing Machines (2008): faceLAB LINK User Manual. Seeing Machines, Canberra.
FaceLAB5 2009a	Seeing Machines (2009): faceLAB 5 User Manual. Seeing Machines, Canberra.
FaceLAB5 2009b	Seeing Machines (2009): faceLAB 5 Eyetracking for Research. Seeing Machines, Canberra.
FaceLAB5 2011	Seeing Machines (2011): Output Data Reference Guide. Seeing Machines, Canberra.

FARO 2007	FARO (2007): Platinum FaroArm Product Specification. FARO Technologies, Lake Mary.
Fastenmeier 1995	Fastenmeier, Wolfgang (1995): Autofahrer und Verkehrssituation - Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme. In: Häcker, Hartmut (Hrsg.): Reihe Mensch-Fahrzeug-Umwelt, Band 33, Verlag TÜV Rheinland, Deutscher Psychologen-Verlag, Bonn.
Feist & Mayrhofer 2006	Feist, Florian; Mayrhofer, Erich (2006): Fußgänger- und Radfahrer Schutz bei Nutzfahrzeugen – Zwischenbericht aus dem EU-Projekt APROSYS. In: 5. DEKRA/VDI Symposium Sicherheit von Nutzfahrzeugen. DEKRA Automobil GmbH, Neumünster.
Field 2013	Field, Andy (2013): Discovering Statistics using IBM SPSS Statistics. SAGE Publications, London.
Flannagan et al. 2002	Flannagan, Michael; Sivak, Michael; Mefford, Mary Lynn (2002): Distance Perception in Camera-Based Rear Vision Systems. Technical Paper 2002-01-0012, SAE International, Detroit, Michigan.
Fornell-Fagerström & Gardlund 2012	Fornell-Fagerström, Katarina; Gardlund, Alexander (2012): Mirror replacement in trucks. Master Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg.
Frank 2012	Frank, Thorsten (2012): Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen - Stand des Wissens. In: FAT-Schriftenreihe Nr. 241, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., Berlin.
Friedrichsen 2013	Friedrichsen, Viktor (2013): Erstellung eines neuen RAMSIS LKW-Fahrhaltungsmodells. Masterarbeit. Fachhochschule Kaiserslautern, Kaiserslautern.
Fröhmel 2010	Fröhmel, Christin (2010): Validierung des RAMSIS-Krafthaltungsmodells. Dissertation. Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie, München.
Geuß 1994	Geuß, Hartwich (1994): Entwicklung eines anthropometrischen Meßverfahrens für das CAD-Menschmodell RAMSIS. Dissertation. Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie, München.
Glauner 2006	Glauner, Erich (2006): Sicht auf Kombiinstrumente. Interne Unterlage. Daimler AG, Stuttgart.
Google Maps 2014	Google Maps (2014): Digitales Kartenmaterial. Zugriff unter: <a href="https://maps.google.de">https://maps.google.de</a> , Google, Mountain View.
Göpfert et al. 2013	Göpfert, Ingrid; Schulz, Matthias; Wellbrock, Wanja (2013): Trends in der Automobillogistik. In: Göpfert, Ingrid; Braun, David; Schulz, Matthias (Hrsg.) Automobillogistik - Stand und Zukunftstrends. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
Grandjean 1991	Grandjean, Etienne (1991): Physiologische Arbeitsgestaltung – Leitfaden der Ergonomie. Ott-Verlag, Thun.
Hakuli et al. 2012	Hakuli, Stephan et al. (2012): Kooperative Automation. In: Winner, Hermann et al. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien, Wiesbaden.
Hammond & Roe 1972	Hammond, David; Roe, Ronald (1972): Driver Head and Eye Positions. Technical Paper 720200, SAE International, Warrendale.
Helfer 2013	Helfer, Martin (2013): Umströmungsgeräusche. In: Schütz, Thomas (Hrsg.): Hucho – Aerodynamik des Automobils. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
Herrmann & Scheuer 2011	Herrmann, Hans-Jürgen; Scheuer, Stephan (2011): Optische Anforderungen und Prüfverfahren für Kamera-Monitor-Systeme für indirekte Sicht in Fahrzeugen. INS Zwischenbericht. TÜV Rheinland LGA Products GmbH, Köln.
Hristov 2009	Hristov, Borislav (2009): Untersuchung des Blickverhaltens von Kraftfahrern auf Autobahnen. Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden.

- 
- 
- |                       |   |
|-----------------------|---|
| Hochberg 1974         | Hochberg, Yosef (1974): Some Generalizations of the T-Method in Simultaneous Inference. In: Journal of Multivariate Analysis, 4, Elsevier, Amsterdam.   |
| Hochberg 1988         | Hochberg, Yosef (1988): A sharper Bonferroni procedure for multiple tests of significance. In: Biometrika, Oxford University Press, Oxford.   |
| Hoepke & Brähler 2010 | Hoepke, Erich; Brähler, Hermann (2010): Einführung in die Nutzfahrzeugtechnik. In: Hoepke, Erich; Breuer, Stefan (Hrsg.) Nutzfahrzeugtechnik. Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien, Wiesbaden.  |
| Hoffman 1998          | Hoffman, James (1998): Visual attention and eye movements. In: Pashler Harold (Hrsg.): Attention. University College London Press, London.  |
| Huber et al. 2014     | Huber, Richard; Kober, Werner; Deuschle Konrad (2014): Modellbasierte Sollspurvorgabe für querdynamisch wirkende Assistenzsysteme zum Einsatz in schweren Nutzfahrzeugen. In: Tagungsband 6. Grazer Nutzfahrzeug Workshop, Graz.                            |
| Hudelmaier 2002       | Hudelmaier, Jörg (2002): Sichtanalyse im Pkw unter Berücksichtigung von Bewegung und individuellen Körpercharakteristika. Dissertation. Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie, München.   |
| Hughes et al. 2011    | Hughes, Ciarán et al. (2011): Trends Towards Automotive Electronic Vision Systems for Mitigation of Accidents in Safety Critical Situations. In: Chiaberge, Marcello (Hrsg.): New Trends and Developments in Automotive System Engineering, InTech, Rijeka. |
| Human Solutions 2009  | Human Solutions (2009): RAMSIS COGNITIVE - A RAMSIS AUTOMOTIVE MODULE, Human Solutions GmbH, Kaiserslautern.  |
| Human Solutions 2012  | Human Solutions (2012): BodyBuilder - Handbuch Version 1.4. Human Solutions GmbH, Kaiserslautern.   |
| Human Solutions 2013  | Human Solutions (2013): RAMSIS in CATIA V5 – Handbuch Version 3.8.37. Human Solutions GmbH, Kaiserslautern.   |
| Isermann et al. 2012  | Isermann, Rolf et al. (2012): Antikollisionssystem PRORETA – Integrierte Lösung zur Vermeidung von Überholunfällen. In: Winner, Hermann et al. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien, Wiesbaden.             |
| James 1890            | James, William (1890): The principles of psychology Vol. I. American Science Series – Advanced Course. Harvard University, Henry Holt and Company, New York.  |
| Jahns et al. 2001     | Jahns, Steven; Reed, Matthew; Hardee, Lenora (2001): Methods for In-Vehicle Measurement of Truck Driver Postures. Technical Paper 2000-01-2821, SAE International, Chicago, Illinois.   |
| Johansson 2012        | Johansson, P. (2012): Vision zones - direct visibility evaluation. In: Fornell-Fagerström, Katarina; Gardlund, Alexander (2012): Mirror replacement in trucks. Master Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg.                                |
| Jürgens 1989a         | Jürgens, Hans (1989): Anthropometrie – Achsen und Bezugssysteme. In: Schmidtke, Heinz (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien und Methoden. Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz.                          |
| Jürgens 1989b         | Jürgens, Hans (1989): Anthropometrie – Die Kombination von Körpermaßen. In: Schmidtke, Heinz (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien und Methoden. Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz.                   |
| Jürgens 1999          | Jürgens, Hans (1999): Körpermaße. In: Schmidtke, Heinz (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien und Methoden. Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz.   |



- 
- 
- Jürgens et al. 2000 Jürgens, Hans; Helbig, Konrad; Küchmeister, Gerd (2000): Anthropometrische und biomechanische Untersuchungen an Fahrern und Fahrerinnen von Reisebussen und Lastkraftwagen – Im Auftrag der Berufsgenossenschaft für Fahrzeughaltungen. Projektbericht. Forschungsgruppe Industrieanthropologie der Universität Kiel, Kiel.
- Kaiser 2011 Kaiser, Ralf (2011): Anthropometrie – Neue Erkenntnisse und Anwendungsbeispiele. In: Tagungsband zur RAMSIS User Conference 2011, Human Solutions, Kaiserslautern.
- Kandel et al. 1996 Kandel, Eric et al. (1996): Neurowissenschaften - Eine Einführung. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Karsh & Breitenbach 1983 Karsh, R.; Breitenbach, FW. (1983): Looking at looking: The amorphous fixation measure. In: Groner, R. et al. (Hrsg.): Eye movements and psychological functions: International views, Erlbaum, Hillsdale.
- Kasties 2013 Kasties, Günther (2013): Telematik. In: Braess, Hans-Hermann; Seiffert, Ulrich (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- KBA 2011 Kraftfahrt-Bundesamt (2011): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge, Verkehrsaufkommen Jahr 2010. Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg.
- KBA 2012 Kraftfahrt-Bundesamt (2012): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge, Verkehrsaufkommen Jahr 2011. Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg.
- Koch 2012 Koch, Susanne (2012): Logistik - Eine Einführung in Ökonomie und Nachhaltigkeit. Springer-Verlag, Berlin.
- Kopp & Frank 2013 Kopp, Stephan; Frank, Thorsten (2013): Nutzfahrzeuge. In: Schütz, Thomas (Hrsg.): Hucho – Aerodynamik des Automobils. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Krist 1993 Krist, Renate (1993): Modellierung des Sitzkomforts – Eine Experimentelle Studie. Dissertation. Katholische Universität Eichstätt. In: FAT-Schriftenreihe Nr. 123, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., Berlin.
- Krueger 1989 Krueger, Helmut (1989): Sehen. In: Schmidtke, Heinz (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien und Methoden. Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz.
- Lang & Kunz 2012 Lang, Werner; Kunz, Manuel (2012): Sichtsystem für ein Nutzfahrzeug zur Darstellung von gesetzlich vorgeschriebenen Sichtfeldern eines Hauptspiegels und eines Weitwinkelspiegels. Offenlegungsschrift. Deutsches Patent- und Markenamt, München.
- Lang et al. 2012a Lang, Werner et al. (2012): Spiegelersatzsystem für ein Fahrzeug. Patentschrift. Deutsches Patent- und Markenamt, München.
- Lang et al. 2012b Lang, Werner et al. (2012): Kameraarm für eine Spiegelersatzsystem-Kamera eines Kraftfahrzeugs. Patentschrift. Deutsches Patent- und Markenamt, München.
- Lehto Way & Reed 2003 Lehto, Michelle; Reed, Matthew (2003): A Method for Measuring the Field of View in Vehicle Mirrors. University of Michigan; Transportation Research Institute, Michigan.
- Link et al. 2008 Link, Daniel et al. (2008): Berührungslose Augen- und Blickbewegungsmessung. In: Schmidt, Ludger et al. (Hrsg.): Ergonomie und Mensch-Maschine-Systeme. Springer-Verlag, Berlin.
- Luczak 1975 Luczak, Holger (1975): Untersuchungen informatorischer Belastung und Beanspruchung des Menschen. Dissertation. In: Fortschrittsberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 10, Nr. 2, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Maierhofer 2011 Maierhofer, Bernd (2011): Gütertransport der Zukunft: Wie verändert sich das Nutzfahrzeug? In: Automobiltechnische Zeitschrift Sonderausgabe 125 Jahre Automobil, Springer Fachmedien, Wiesbaden.

---

---

Manary et al. 1998	Manary, Miriam; Flannagan, Reed, Matthew; Carol; Schneider, Lawrence (1998): Development of an Improved Driver Eye Position Model. Human Factors in Driving, Vehicle Seating, and Rear Vision, Technical Paper 980012, SAE International, Detroit, Michigan.
Marascuilo & Serlin 1968	Marascuilo, Leonard; Serlin, Ronald (1968): Statistical methods for the social and behavioral sciences. Freeman & Company, New York.
Maxwell 1990	Maxwell, Scott; Delaney, Harold (1990): Designing Experiments and Analyzing Data: A Model Comparison Perspective. Wadsworth, Belmont.
MEKRA 2013	MEKRAtronic (2013): Kamera-Monitorssysteme. Produktkatalog 2013, MEKRAtronic, Ergersheim.
Meldrum 1965	Meldrum, James (1965): Automobile driver eye position. Technical Paper 650464, SAE International, Warrendale.
Meurle et al. 2009	Meurle, Jürgen; Rigel, Stefan; Muigg, Andreas (2009): Fahrzeugeigenschaften – Erwartungshaltung des Kunden und technische Umsetzbarkeit. In: Vortragsreihe Fahrzeugtechnik, Institut für Fahrzeugtechnik, FH JOANNEUM, Graz.
Müller 2010	Müller, Alexander (2010): Systematische und nutzerzentrierte Generierung des Pkw-Maßkonzepts als Grundlage des Interior- und Exterior-Design. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart.
Niewöhner et al. 2004	Niewöhner, Walter et al. (2004): Innerortsunfälle mit rechts abbiegenden Lastkraftwagen und ungeschützten Verkehrsteilnehmern. In: 4. DEKRA/VDI Symposium Sicherheit von Nutzfahrzeugen. DEKRA Automobil GmbH, Neumünster.
Nitze 2011	Nitze, Marc (2011): Modellbasierter Ansatz zur Berechnung des Knickwinkels eines Gliederzugs aus fahrzeugeigenen Signalen. Bachelorarbeit. Duale Hochschule Baden-Württemberg, Stuttgart.
Ochs 2012	Ochs, Andreas (2012): Implementierung und Validierung einer Schleppkurven-Warnung für einen Gliederzug mit Tandem-Anhänger. Bachelorarbeit. Duale Hochschule Ravensburg, Friedrichshafen.
Pannasch 2003	Pannasch, Sebastian (2003): Ereignisbezogene Veränderungen der visuellen Fixationsdauer. Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden.
Partmann et al. 1996	Partmann, Thomas; Reinig, Hans-Joachim; Struck, Günther (1996): Blickbewegungsmessung als Werkzeug für die Gestaltung und Bewertung von bord- und straßenseitigen Informationssystemen für den Kraftfahrer. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT), Frankfurt am Main.
Pfaffenbauer et al. 2010	Pfaffenbauer, Tobias et al. (2010): Unfallstruktur- und Wirkpotenzialanalysen zu den AKTIV-Applikationen auf der Basis von Lkw-Haftpflichtschäden, AZT Automotive GmbH, München.
Philippart et al. 1985	Philippart, Nancy et al. (1985): Describing the Truck Driver Workspace. Technical Paper 852317, SAE International, Warrendale.
Rasmussen 1983	Rasmussen, Jens (1983): Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, New York.
Reed et al. 1999	Reed, Matthew; Manary, Miriam; Flannagan, Carol; Schneider, Lawrence (1999): Automobile Occupant Posture Prediction for Use with Human Models. Digital Human Modeling for Design and Engineering, Technical Paper 1999-01-0966, SAE International, Detroit, Michigan.

- 
- 
- |                      |  |
|----------------------|--|
| Reed et al. 2000a    | Reed, Matthew; Manary, Miriam; Flannagan, Carol; Schneider, Lawrence (2000): Comparison of Methods for Predicting Automobile Driver Posture. Digital Human Modeling for Design and Engineering, Technical Paper 2000-01-2180, SAE International, Dearborn, Michigan. |
| Reed et al. 2000b    | Reed, Matthew; Lehto, Michelle; Flannagan, Michael (2000): Field of View in Passenger Car Mirrors. Report. University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor, Michigan.  |
| Reed et al. 2001     | Reed, Matthew; Ebert, Sheila; Flannagan, Michael (2001): Mirror Field of View in Light Trucks, Minivans, and Sport Utility Vehicles. Report. University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor, Michigan.  |
| Remlinger 2013       | Remlinger, Wolfram Michael (2013): Analyse von Sichteinschränkungen im Fahrzeug. Dissertation. Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie, München.   |
| Renschler 2008       | Renschler, Andreas (2008): Vision 20-20, European Automobile Manufacturers Association (ACEA) Pressekonferenz auf der IAA 2008, Hannover.  |
| Rigel 2005           | Rigel, Stefan (2005): Entwicklung und Validierung einer Methode zur quantitativen Untersuchung der Ein- und Ausstiegsbewegung in einen Pkw. Dissertation. Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie, München.  |
| Ripper 2012          | Ripper, Stefan (2012): Knickwinkelschätzung – Validierung und Sensitivitätsanalyse für einen Gliederzug. Bachelorarbeit. Hochschule Ulm, Ulm.  |
| Rockwell et al. 1968 | Rockwell, Thomas et al. (1968): Drivers' Eye Movements: An Apparatus and Calibration. Highway Research Record 247, National Research Council, Washington.  |
| Rockwell 1972        | Rockwell, Thomas (1972): Skills, judgment and information acquisition in driving. In: Forbes, T. (Hrsg.): Human Factors in Highway Traffic Safety Research, Wiley-Interscience, New York.  |
| Schaller 2008        | Schaller, Florian (2008): Einsatz von RAMSIS in der Innenraumgestaltung bei BMW. In: Tagungsband zur RAMSIS User Conference 2008, Human Solutions, Kaiserslautern.   |
| Schlick et al. 2010  | Schlick, Christopher; Bruder, Ralph; Luczak, Holger (2010): Arbeitswissenschaft. 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.   |
| Schmidtke 1989       | Schmidtke, Heinz (1989): Sehen. In: Schmidtke, Heinz (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien und Methoden. Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz.  |
| Schober 1950         | Schober, Herbert (1950): Das Sehen, I. Band. Markewitz-Verlag, Darmstadt.  |
| Schober 1954         | Schober, Herbert (1954): Das Sehen, II. Band. Fachbuchverlag, Leipzig.   |
| Scholly 2002         | Scholly, Uwe (2002): Ermittlung des Sichtbedarfs im Straßenverkehr – Methodik, Tools, Feldversuch. Interne Unterlage. Daimler AG, Stuttgart.   |
| Scholly 2006         | Scholly, Uwe (2006): Sicht im PKW – Evaluationsmethoden in der Praxis. In: Tagungsband Herbstkonferenz der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA), Stuttgart.  |
| Schweigert 2002      | Schweigert, Manfred (2002): Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben. Dissertation. Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie, München.  |
| Seidl 1994           | Seidl, Andreas (1994): Das Menschmodell RAMSIS Analyse, Synthese und Simulation dreidimensionaler Körperhaltungen des Menschen. Dissertation. Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie, München.  |
| Seidl 1997           | Seidl, Andreas (1997): Computer-Menschmodelle in der Ergonomie. In: Schmidtke, Heinz (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien und Methoden. Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz.                                    |

Seitz & Bubb 1999	Seitz, Thomas; Bubb, Heiner (1999): Measuring of Human Anthropometry, Posture and Motion. Technical Paper 1999-01-1913, SAE International, Warrendale.
Seitz & Bubb 2001	Seitz, Thomas; Bubb, Heiner (2001): Human-Model Based Movement-Capturing Without Markers for Ergonomic Studies. Technical Paper 2001-01-2113, SAE International, Warrendale.
Shell 2010	Shell (2010): Shell Lkw-Studie. Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030. Shell Deutschland, Hamburg.
Shibata et al. 2006	Shibata, Yuichi; Schmidt-Clausen, H.-J; Diem, Carsten (2006): The Evaluation of AFS Beam Pattern using the Movement of the Driver's Eye Fixation Points. Technical Paper 2006-01-0944, SAE International, Detroit, Michigan.
Siegel & Castellan 1988	Siegel, Sidney; Castellan, John (1988): Nonparametric statistics for the behavioral sciences. McGraw-Hill, New York.
Smart Eye Pro 5 2013	Smart Eye AB (2013): Smart Eye Pro 5 – Remote 3D Eye Tracking for Research. Datasheet. Smart Eye AB, Gothenburg.
Southall et al. 1998	Southall, Dean; Tait, Richard; Walsh, Tony (1998): Drivers' field of view from large vehicles. Phase 2. The Department of Environment, Transport and the Regions (DETR), London.
Spearman 1910	Spearman, Charles (1910): Correlation calculated with faulty data. In: British Journal of Psychology, 3, London.
Speyer 1997	Speyer, Hartmut (1997): Mathematische Nachbildung des Menschen - RAMSIS 3D Softdummy. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT), Frankfurt am Main.
Speyer 2005	Speyer, Hartmut (2005): RAMSIS - On the Definition and Generation of Optimal Test Samples for Design Problems. Human Solutions GmbH, Kaiserslautern.
Speyer 2012	Speyer, Hartmut (2012): RAMSIS - Anthropometrische Datenbanken. Human Solutions GmbH, Kaiserslautern.
Tait & Southall 1998	Tait, Richard; Southall, Dean (1998): Drivers' field of view from large vehicles. Phase 3. The Department of Environment, Transport and the Regions (DETR), London.
Thom 2006	Thom Rudolf (2006): Sind Regularien die wahre Triebfeder der Entwicklung? Teil 2: Verbrauchsvorschriften und Energieressourcen. Vorlesungsmanuskript. Universität Stuttgart. Stuttgart.
Transcat 2012	Transcat PLM (2012): CAVA – Solutions for car design and legal compliance in Catia V5. Transcat PLM, Karlsruhe.
Vector 2013	Vector (2013): Produktinformation GL-Logger-Familien. Vector Informatik GmbH, Stuttgart.
Wagner 2007	Wagner, Peer-Oliver (2007): Ergonomie im Produktentstehungsprozess. In: Tagungsband zur RAMSIS User Conference 2007, Human Solutions, Kaiserslautern.
Wickens & Hollands 1999	Wickens, Christopher; Hollands, Justin (1999): Engineering Psychology and Human Performance, Third Edition. Prentice Hall, Upper Saddle River.
Wilcox 1996	Wilcox, Rand (1996): Statistics for the Social Sciences. Academic Press, San Diego.
Woyna et al. 2010	Woyna, Lars; Gloger Stefan; Bruder Ralph (2010): Methodische Ansätze zur Sichtbeurteilung im Fahrzeug. In: Tagungsband des 56. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA), Dortmund.
Woyna et al. 2011	Woyna, Lars et al. (2011): Der Einfluss der Sichtbeeinträchtigung durch die A-Säule auf die Fahrzeugführung – eine Vergleichsstudie im Fahrsimulator. In: Tagungsband des 57. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA), Chemnitz.

---

Woyna 2013	Woyna, Lars (2013): Fahrerzentrierter Kriterienkatalog zur Außensichtbeurteilung im PKW. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
Yarbus 1967	Yarbus, Alfred (1967): Eye Movements and Vision. Plenum Press, New York.
Yijun et al. 2010	Yijun, Liu; Shen Yanhua; Xiaxu, Huang (2010): Design of Eye-cab of Dump Truck. Technical Paper 2010-01-0773, SAE International, Beijing.
Zaindl et al. 2013	Zaindl, Albert et al. (2013): Method to analyze the body movement for the mirror view and test method to verify the simulated results. 2nd International Digital Human Modeling Symposium, Ann Arbor.
Zaindl et al. 2014	Zaindl, Albert et al. (2014): Analyse der Kopfbewegung bei der Spiegelnutzung im Nutzfahrzeug. In: Tagungsband des 60. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA), München.
Ziegler 2008	Ziegler, Maik (2008): Nutzfahrzeuge für den globalen Einsatz. In: Volker Schindler; Immo Sievers (Hrsg.): Forschung für das Auto von morgen. Aus Tradition entsteht Zukunft. Springer, Berlin.
Zink 2013	Zink, Miriam (2013): Entwicklung einer generischen Dokumentation für die Absicherung von Ergonomie-Anforderungen im Modellabsicherungsprozess der Daimler AG. Masterarbeit. Fachhochschule Köln, Köln.

#### Normen, Gesetze und Richtlinien:

AAM 2003	Alliance of Automobile Manufacturers (2003): Statement of Principles, Criteria and Verification Procedures on Driver Interactions with Advanced In-Vehicle Information and Communication Systems. Driver Focus-Telematics Working Group, Alliance of Automobile Manufacturers, Washington.
AISÖ 2010	Arbeitsgemeinschaft Internationaler Strassenverkehrsunternehmer Österreichs (2010): ECO-DRIVING SAFELY für Lkw - Ökonomisch und ökologisch denken! AISÖ, Wien.
BMVBW 2005	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (2005): Fahrpersonalverordnung – FpersV. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin.
DIN 33408-1 2008	Deutsches Institut für Normung e.V. (2008): Deutsche Norm, Körperumrisschablonen – Teil 1: Für Sitzarbeitsplätze, Beuth Verlag, Berlin.
StVZO §35b 1987	StVZO (1987): §35b Abs. 2: Richtlinie für die Sicht aus Kraftfahrzeugen. Verordnung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften, Bonn.
ECE-R 46/01 2005	United Nations Economic Commission for Europe (2005): Einheitliche Vorschrift für die Genehmigung von Einrichtungen für indirekte Sicht und von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Anbringung solcher Einrichtungen. UNECE, Geneva.
ECE-R 46/02 2009	United Nations Economic Commission for Europe (2009): Einheitliche Vorschrift für die Genehmigung von Einrichtungen für indirekte Sicht und von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Anbringung solcher Einrichtungen. UNECE, Geneva.
EGV Nr. 561/2006	Europäisches Parlament und Rat (2006): Verordnung (EG) Nr. 561/2006 zur Harmonisierung bestimmter Sozialvorschriften im Straßenverkehr..., In: Amtsblatt der Europäischen Union L102/1, Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, Luxemburg.
FMVSS 111 1999	NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (1999): FMVSS 111 – Rearview Mirrors. U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, Washington.
KOM 2010 265	Europäische Kommission (2010): Analyse der Optionen zur Verringerung der Treibhausgasemissionen um mehr als 20 % und Bewertung des Risikos der Verlagerung von CO <sub>2</sub> -Emissionen. Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, Brüssel.



---

---

KOM 2011 112	Europäische Kommission (2011): Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO <sub>2</sub> -armen Wirtschaft bis 2050. Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, Brüssel.
R 96/53/EG 1996	Europäisches Parlament und Rat (1996): Richtlinie des Rates ... zur Festlegung der höchstzulässigen Abmessungen für bestimmte Straßenfahrzeuge im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr in der Gemeinschaft sowie zur Festlegung der höchstzulässigen Gewichte im grenzüberschreitenden Verkehr. Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, Luxemburg.
ISO/FDIS 16505 2014	International Organization for Standardization (2014): Road vehicles – Ergonomic and performance aspects of Camera-Monitor Systems – Requirements and test procedures. Final Draft International Standard, International Organization for Standardization, Geneva.
ISO 15007-1 2002	International Organization for Standardization (2002): Road vehicles - Measurement of driver visual behavior with respect to transport information and control systems - Part 1: Definitions and parameters. International Organization for Standardization, Geneva.
ISO/DIS 15007-1 2013	International Organization for Standardization (2013): Road vehicles - Measurement of driver visual behavior with respect to transport information and control systems - Part 1: Definitions and parameters. Draft International Standard, International Organization for Standardization, Geneva.
ISO 15007-2 2001	International Organization for Standardization (2001): Road vehicles - Measurement of driver visual behavior with respect to transport information and control systems - Part 2: Equipment and procedures. International Organization for Standardization, Geneva.
SAE J941 1997	Society of Automotive Engineers (1997): Motor Vehicle Drivers' Eye Locations. Surface Vehicle Recommended Practice. SAE International, Warrendale.
SAE J941 2010	Society of Automotive Engineers (2010): Motor Vehicle Drivers' Eye Locations. Surface Vehicle Recommended Practice. SAE International, Warrendale.
SAE J1050 1973	Society of Automotive Engineers (1973): Describing and Measuring the Driver's Field of View. Surface Vehicle Recommended Practice. SAE International, Warrendale.
SAE J1050 2009	Society of Automotive Engineers (2009): Describing and Measuring the Driver's Field of View. Surface Vehicle Recommended Practice. SAE International, Warrendale.

#### Abschlussarbeiten unter Anleitung des Verfassers:

Gatti 2013	Gatti, Davide (2013): Relationship between driver-desired indirect field of vision and truck-trailer angle in dynamic driving situations of long-haulage trucks. Master thesis. Technical University of Delft, Delft.
Hebe 2012	Hebe, Jennifer (2012): Erstellung und Anwendung eines CAD-Modells zur Ermittlung realer Sichtbereiche der indirekten Sicht in Nutzfahrzeugen. Bachelorarbeit. Duale Hochschule Baden-Württemberg, Stuttgart.
Isella 2012	Isella, Kathrin (2012): Methodische Anforderungsdefinition zur Ermittlung dynamischer Augpunktlagen in LKWs und Anwendung der Messergebnisse in einem CAD-Tool zur Anzeigenbewertung. Diplomarbeit. Universität Stuttgart, Stuttgart.
Kläser 2013	Kläser, Benedikt (2013): Erstellung und Validierung von Auslegungsgeometrien zur ergonomischen Absicherung von Anzeige- und Sichtsystemen in schweren Nutzfahrzeugen. Masterarbeit. Hochschule Trier, Trier.

